



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

BRUNO EDUARDO MEDINA

**INTERNET DAS COISAS EM EDIFÍCIOS INTELIGENTES:
DESENVOLVIMENTO DE UMA REDE DE SENSORES E ATUADORES SEM
FIO PARA O CONTROLE DE SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO**

***INTERNET OF THINGS IN SMART BUILDINGS: DEVELOPMENT OF
A WIRELESS SENSOR AND ACTUATOR NETWORK AIMED TO
CONTROL CLIMATIZATION SYSTEMS***

CAMPINAS

2017



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

BRUNO EDUARDO MEDINA

**INTERNET DAS COISAS EM EDIFÍCIOS INTELIGENTES:
DESENVOLVIMENTO DE UMA REDE DE SENSORES E ATUADORES SEM
FIO PARA O CONTROLE DE SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO**

Orientador: Prof. Dr. Leandro Tiago Manera

***INTERNET OF THINGS IN SMART BUILDINGS: DEVELOPMENT OF
A WIRELESS SENSOR AND ACTUATOR NETWORK AIMED TO
CONTROL CLIMATIZATION SYSTEMS***

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Master dissertation presented to the Electrical Engineering Postgraduation Programm of the School of Engineering Electrical of the University of Campinas to obtain the M.Sc grade in Engineering Electrical, in field of Electronics, Microelectronics and Optoelectronics.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

DEFENDIDA PELO ALUNO BRUNO EDUARDO MEDINA

E ORIENTADA PELO PROF. DR. LEANDRO TIAGO MANERA

Assinatura do Orientador

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

M468i	<p>Medina, Bruno Eduardo, 1989- Internet das coisas em edifícios inteligentes : desenvolvimento de uma rede de sensores e atuadores sem fio para o controle de sistemas de climatização / Bruno Eduardo Medina. – Campinas, SP : [s.n.], 2017.</p> <p>Orientador: Leandro Tiago Manera. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.</p> <p>1. Internet das coisas. 2. Ar condicionado. 3. Edifícios inteligentes. 4. Sistemas embarcados (Computadores). 5. Conforto térmico. I. Manera, Leandro Tiago, 1977-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.</p>
-------	--

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Internet of things in smart buildings : development of a wireless sensor and actuator network aimed to control climatization systems

Palavras-chave em inglês:

Internet of things

Air conditioning

Smart buildings

Embedded systems (Computers)

Thermal comfort

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Leandro Tiago Manera [Orientador]

Leonardo de Souza Mendes

Ana Lucia Nogueira de Camargo Harris

Data de defesa: 06-10-2017

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA – DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Candidato: Bruno Eduardo Medina RA:090548

Data da defesa: 06 de outubro de 2017

Título da defesa: “Internet das Coisas em Edifícios Inteligentes: Desenvolvimento de Uma Rede de Sensores e Atuadores sem Fio para o Controle de Sistemas de Climatização”

Prof. Dr. Leandro Tiago Manera (FEEC/UNICAMP)

Profa. Dra. Ana Lucia Nogueira de Camargo Harris (FEC/UNICAMP)

Prof. Dr. Leonardo de Souza Mendes (FEEC/UNICAMP)

A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

*Agradeço aos meus pais e ao meu irmão, companheiros
de jornada que tornaram este momento possível.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Leandro Tiago Manera pela parceria e confiança ao longo da minha carreira acadêmica. O seu apoio ao longo do desenvolvimento deste trabalho, foi fundamental para garantir a qualidade dos resultados. Agradeço também à empresa Robert Bosch Ltda que, através do programa denominado Inova-Talentos possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa.

Juntos, Unicamp e Bosch possibilitaram a abertura de uma porta para o desenvolvimento de uma pesquisa de mestrado que combinasse assuntos relevantes do ponto de vista acadêmico e com grande interesse para a comunidade.

Gostaria de agradecer também à Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas. Como aluno de graduação e mestrado desta instituição me orgulho de fazer parte da comunidade acadêmica e fico feliz em poder contribuir com esta pesquisa de mestrado. Enfrentando todas as dificuldades atreladas a situação sócio econômica de nosso país, reconheço e admiro o grande trabalho desta instituição para garantir e manter a infraestrutura necessária para a realização das atividades acadêmicas e possuir um corpo docente de altíssimo nível de excelência, com reconhecimento nacional e internacional.

Gostaria também de agradecer a Prof. Dr. Ana Lúcia Nogueira de Camargo Harris por toda a sua inspiração e parceria ao longo do desenvolvimento dos meus trabalhos acadêmicos. Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta o uso do conceito de Internet das Coisas como ferramenta para o desenvolvimento de uma rede sem fio de sensores e atuadores com o objetivo de propor uma atualização tecnológica em aparelhos de ar condicionado instalados em edifícios e residências brasileiras. A solução proposta é capaz de agregar novas funcionalidades aos sistemas de climatização convencionais novos ou já instalados em construções antigas, promovendo o conceito de edifícios inteligentes. A análise inicial dos sistemas de climatização convencionais mostrou que a dependência existente entre os usuários e o comando dos aparelhos de ar condicionado pelo controle remoto gera um desperdício no consumo de energia elétrica, seja pela má regulação dos aparelhos ou por mantê-los acionados em períodos desnecessários. Para realizar o controle dos aparelhos de ar condicionado foi necessário desenvolver um software capaz de aprender os sinais enviados pelo controle remoto de qualquer tipo de aparelho de ar condicionado. Esses comandos foram salvos nos módulos atuadores instalados nos aparelhos de ar condicionado. Através de uma rede de sensores e atuadores sem fio construída com tecnologia de comunicação sem fio (XBee), foi possível centralizar o comando de um conjunto de aparelhos de ar condicionado. Para garantir o conforto térmico dos usuários foi elaborado um algoritmo que utiliza valores de temperatura externa e umidade relativo do ar coletados pelo módulo sensor de temperatura para estabelecer a temperatura de operação dos aparelhos de ar condicionado. Estes valores são transmitidos pela rede de comunicação do sistema e, com base nos horários de funcionamento estabelecidos pelo usuário na central de comando, é feito o controle dos aparelhos. Ao utilizar uma rede mesh com protocolo DigiMesh, cada dispositivo atua como um roteador, aumentando o alcance da rede e facilitando possíveis expansões. O sistema proposto foi validado por meio de um estudo de caso realizado em um escritório administrativo da empresa Robert Bosch, localizada em Campinas. Os resultados mostram que a tecnologia é capaz de reduzir o consumo de energia elétrica em uma média de até 22%. Dada a característica inovadora da pesquisa foi realizado um depósito de patente do módulo de comando dos aparelhos de ar condicionado junto ao INPI sob o número BR 10 2016 023243 0.

Palavras-chave: Internet das Coisas. Ar Condicionado. Rede Mesh. Edifícios Inteligentes

ABSTRACT

This work presents the use of the Internet of Things concept as a tool for the development of a wireless sensor and actuator network with a proposition of a technological retrofit on air conditioners installed in Brazilian buildings. The proposed system can add new functionalities to both new or already installed conventional air conditioning systems in existing buildings, promoting the concept of intelligent buildings. Initial analysis shows that conventional air conditioning systems present an issue between users and the remote control of the air conditioners. This usage may cause waste in energy consumption, either by inadequate regulation of the appliances or by keeping them activated when unnecessary. During the development of a new way of controlling the equipment it was necessary to elaborate a software capable of learning the signals sent by the remote control of any type of air conditioner. These commands have been saved in the actuator modules program installed in the air conditioner equipment. Through a wireless sensor and actuator network implemented with a radio frequency communication (XBee), it was possible to centralize the command of a set of air conditioners. In order to guarantee the thermal comfort of the users an algorithm was developed to consider inputs such as external temperature and air humidity collected by a sensor module to establish the set-point temperature of air conditioner equipment. These values are transmitted by the communication network and the system operates during the established period set by local users at the center control module. By using a mesh network with DigiMesh protocol, each device acts as a router, increasing the reach of the network and facilitating possible expansions. The proposed system was validated through a case study carried out in an administrative office of the Robert Bosch Company located in Campinas. The results show that the technology is able to reduce electric power consumption by an average of up to 22%. Given the innovative feature of the research, a patent deposit was in control module of the air conditioner equipment at INPI registered by the number BR 10 2016 023243 0 .

Keywords: *Internet of Things. Air conditioning. Mesh Network. Smart Buildings.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etiquetas RFID: Sistemas passivos e ativos. (Elaborado pelo autor).	24
Figura 2. Exemplo de configuração de uma rede ZigBee. Adaptado de [15].	26
Figura 3. Exemplo de configuração de uma rede DigiMesh. Adaptado de [15].	27
Figura 4. Tecnologias presentes em um sistema de iluminação inteligente e suas respectivas relações. Adaptado de [35].	39
Figura 5. Componentes de uma rede elétrica inteligente. Adaptada de [44].	43
Figura 6. Características de um SBDaaS. Adaptado de [55].	47
Figura 7. Antes (esquerda) do retrofit e edifício após o projeto (direita). Extraído de [59].	48
Figura 8. Edifícios de escritórios em Klipporna, Malmö, Suécia. Extraído de [59].	49
Figura 9. Planta da Microsoft localizada na cidade de Redmond. Extraído de [60].	50
Figura 10. Comparativo da demanda de energia (em W/square feet) entre um edifício típico e um edifício inteligente e o comportamento do preço da energia elétrica (em centavos/quilowatt-hora) ao longo de um dia. Adaptado de [61].	54
Figura 11. Infraestrutura TIC. Adaptado de [63].	55
Figura 12. Estudo de caso do projeto HosPilot aplicado no Hospital San Pedro, Logroño, Espanha. Extraído de [64].	56
Figura 13. Trocas de calor e o meio ambiente. Imagem extraída de [65].	60
Figura 14. Modelo de sistema self contained. Imagem extraída de < https://www.carrier.com/residential/en/us/products/ductless-systems/ > acesso em outubro de 2017.	65
Figura 15. Evaporadoras do tipo cassete, piso e teto (da esquerda para a direita). Imagens extraídas de < https://www.carrier.com/residential/en/us/products/ductless-systems/ > acesso em outubro de 2017.	65
Figura 16. Arquitetura de desenvolvimento. Elaborada pelo autor.	67
Figura 17. Metodologia da solução proposta, indicando as tecnologias utilizadas para cada um de seus componentes e o tipo de comunicação entre eles. Elaborado pelo autor.	69
Figura 18. Frequências de ondas. Extraído de < http://rede.novaescolaclube.org.br/planos-de-aula/control-remoto > acesso em outubro de 2017.	70

Figura 19. Exemplo de sinal enviado pelo controle remoto. Extraído de < http://www.crcontroleremoto.com.br/como-funciona-um-controleremoto.html > acesso em outubro de 2017.	70
Figura 20. Pinagem do IRM8751. Extraído de [68].	71
Figura 21. Diagrama de blocos do IRM8751 sinal da porta de saída. Extraído de [68].	71
Figura 22. Circuito receptor de sinal infravermelho. Elaborado pelo autor.	72
Figura 23. Circuito emissor de IR e pinagem do Arduino. Elaborado pelo autor.	74
Figura 24. Protótipo inicial do receptor e transmissor de sinais infravermelhos para o aparelho cassete de ar condicionado - elaborado para testes durante a primeira fase de desenvolvimento.	75
Figura 25. Dispositivos utilizados para comunicação: XBee Series 1, XBee Shield e montagem com Arduino Uno (da esquerda para a direita). Elaborado pelo autor.	76
Figura 26. Display LCD com módulo I2C integrado. Extraído de [70].	78
Figura 27. Estrutura do menu da central de comunicação e divisão em nós. Elaborado pelo autor.	81
Figura 28. Módulo RTC DS1307. Disponível em < https://www.filipeflop.com/wp- content/uploads/2017/07/58634_16883.png > acesso em outubro de 2017.	82
Figura 29. Fluxograma dos módulos atuadores. Elaborado pelo autor.	83
Figura 30. Valores e situações de atenção baseadas no cálculo do índice de calor. Elaborado pelo autor.	84
Figura 31. Valores de índice de calor e temperatura de operação do ar condicionado correspondentes. Elaborado pelo autor.	85
Figura 32. Protótipo elaborado para a central de controle.	86
Figura 33. Módulo monitor de temperatura (superior) e módulo atuador com sensor de presença (inferior).	86
Figura 34. Diagrama de blocos com os componentes instalados no escritório e suas respectivas especificações.	87
Figura 35. Layout do escritório administrativo e pontos de instalação dos dispositivos.	87
Figura 36. Instalação do módulo atuador no interior do cassete de ar condicionado.	88
Figura 37. Alteração no indicador de estado de operação do ar condicionado.	89
Figura 38. Pesquisa realizada com os colaboradores de Facility Management da empresa Robert Bosch Ltda.	90

Figura 39. Economia esperada por faixa de temperatura em comparação a um sistema que trabalha para atender temperatura máxima diária..... 91

Figura 40. Valores de consumo de energia elétrica em p.u. por faixas de temperatura. Comparação de valores de consumo médio em p.u. entre prédios com sistemas de climatização centralizados (prédio 1 e 2) com o sistema Climotion instalado no prédio 3. 93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais características das tecnologias de detecção e coleta de dados RFID e WSN.	25
Tabela 2. Campos de aplicação da IoT.....	29
Tabela 3. Avaliação do potencial de redução de consumo nas casas sociais europeias.....	56
Tabela 4. Avaliação do potencial de redução de consumo nos edifícios públicos europeus.	56
Tabela 5. Temperatura corporal e respostas fisiológicas.....	59
Tabela 6. Taxa de metabolismo e respectivas atividades de acordo com [66].....	61
Tabela 7. Vestimentas e índices de resistência térmica correspondentes. Adaptado de [66].....	61
Tabela 8. Valores de índice de calor e suas classificações.	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	Application Program Interface
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
EPC	Electronic Product Code
IdM	Identity Management
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoE	Internet of Everything
IoT	Internet of Things
LAN	Local Area Network
MAC	Media Access Control
M2M	Machine-to-Machine
PHY	Physical Layer
RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency Identification
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
WSN	Wireless Sensor Networks

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	VI
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XIII
SUMÁRIO	XIV
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 MOTIVAÇÃO	18
1.2 OBJETIVOS	19
1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	20
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 INTERNET DAS COISAS	22
2.1.1 Tecnologias IoT	23
2.1.1.1 Tecnologias de detecção e coleta de dados.....	23
2.1.1.2 Tecnologias de comunicação de dados	25
2.1.1.3 Tecnologias de armazenamento, análise e utilização de dados	27
2.1.2 Áreas de aplicações para Internet das Coisas	28
2.2 DEFINIÇÃO DO TERMO “EDIFÍCIOS INTELIGENTES”	30
2.2.1 Arquitetura para desenvolvimento de um edifício inteligente	33
2.2.1.1 Heterogeneidade	33
2.2.1.2 Sensibilidade ao contexto.....	34
2.2.1.3 Praticidade	35
2.2.1.4 Segurança e privacidade de informações	36
2.2.2 Áreas de aplicações	37
2.2.2.1 Iluminação	37
2.2.2.2 Climatização	39

2.2.2.3 Gerenciamento de energia	41
2.2.2.4 Segurança e sistemas de emergência	44
2.2.2.5 Computação em nuvem	46
2.2.2.6 Retrofit.....	48
2.2.3 A rotina de um edifício inteligente	51
2.2.4 Projetos realizados	54
2.3 CONFORTO TÉRMICO E SISTEMAS DE AR CONDICIONADO.....	58
2.3.1 Variáveis de conforto térmico humanas	60
2.3.2 Variáveis de conforto do ambiente.....	62
2.3.3 Sistemas de ar condicionado.....	63
3 DESENVOLVIMENTO E INSTALAÇÃO DO SISTEMA.....	66
3.1 ARQUITETURA DE DESENVOLVIMENTO	66
3.2 FASES DE DESENVOLVIMENTO	67
3.2.1 Sinal infravermelho.....	69
3.2.2 Comunicação entre dispositivos	75
3.2.3 Central de comunicação.....	77
3.2.4 Módulos Atuadores	82
3.2.5 Monitor de temperatura	83
3.2.6 Integração e prototipagem.....	85
3.3 INSTALAÇÃO DOS DISPOSITIVOS.....	87
4 RESULTADOS	89
4.1 RESULTADOS DO PROTÓTIPO	89
4.1.1 Comparativo dos resultados	91
4.2 RESULTADOS DA PESQUISA.....	93
5 CONCLUSÕES	95
6 TRABALHOS FUTUROS	97
REFERÊNCIAS.....	98
ANEXO A – CÓDIGO PARA IDENTIFICAÇÃO DE COMANDOS INFRVERMELHO TESTE INICIAL.....	99
ANEXO B – CÓDIGO PARA ENVIO DE SINAIS INFRVERMELHOS	99
TESTE INICIAL.....	99

ANEXO C – CÓDIGO UTILIZADO PELA CENTRAL DE COMUNICAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO99

ANEXO D – VALORES DE TEMPERATURA MÁXIMA, TEMPERATURA COMPENSADA MÉDIA, UMIDADE RELATIVA E ÍNDICE DE CALOR PARA A REGIÃO DE SÃO PAULO99

1 INTRODUÇÃO

O setor de edificação é o maior consumidor de energia final em escala mundial. Em 2010, o setor foi responsável por 35% do consumo final mundial de energia, o que corresponde a 1/3 do total das emissões de CO₂ diretas e indiretas relacionadas ao consumo e à produção de energia [1]. O mesmo estudo aponta que a demanda por energia no setor irá aumentar em 50% até 2050. No cenário brasileiro, o ar condicionado é um dos principais consumidores de energia elétrica, responsável por, no mínimo, 47% do consumo de energia elétrica nos prédios [2]. Além disso, a avaliação de posse de equipamentos elétricos estima que em 2014 a posse de ar condicionado por residência brasileira foi de 0,24 sendo que, em 2024, espera-se que esse valor seja de 0,76 [3].

Para atender a esse aumento de demanda por energia, é necessário adotar estratégias e soluções capazes de reduzir esse consumo. O progresso tendencial, ou seja, a energia economizada com reposição tecnológica e aperfeiçoamento de processos, faz parte do escopo de estratégias adotadas pelo Ministério de Minas e Energia durante o planejamento de eficiência energética [4]. O progresso tendencial disponibiliza novas tecnologias no mercado, capazes de entregar o mesmo serviço que seus antecessores, porém, com um consumo de energia inferior. Ao longo da última década, diversas pesquisas foram realizadas sobre a aplicação de Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) em edifícios. Estudos conduzidos pela União Europeia [5] estimam que essas tecnologias viabilizarão a redução de 15% do consumo energético mundial no setor de edifícios nos próximos anos.

O ganho esperado é atrelado à introdução de novos equipamentos ou soluções capazes de fornecer conforto, segurança e recursos necessários aos usuários de uma forma mais eficaz e inteligente do que os sistemas convencionais. Dentre as tecnologias aplicadas aos edifícios, estão os objetos inteligentes – sistemas embarcados, com processamento local, aquisição de dados, fornecimento de ações e interações e, principalmente, capacidade para tomar decisões. Os objetos inteligentes surgem em paralelo à evolução do conceito de Internet das Coisas (Internet of Things – IoT). A IoT trata da capacidade dos dispositivos de se comunicarem entre si, compartilhando informações através de uma infraestrutura dinâmica e dando novas possibilidades de interações entre o mundo virtual e o físico [6]. Quando aplicada em edifícios, a IoT permite que os equipamentos e os sistemas nele instalados estejam conectados uns aos outros por meio de uma rede de comunicação, tornando possível a troca de informações entre os dispositivos e aumentando a performance do sistema como um todo.

Os sistemas de climatização dos edifícios brasileiros são, em sua maioria, compostos por aparelhos de ar condicionado que podem estar conectados ou não a um sistema central de *chillers*. Em sua maioria, trata-se de aparelhos eletrônicos que são acionados por controle remoto e dependem diretamente do usuário para que sejam ligados/desligados e tenham a sua temperatura de operação determinada. Conseqüentemente, essa dependência dá margem ao desperdício de energia atrelado ao mau uso do equipamento. Situações de desperdício estão rela-

cionadas à operação do sistema em períodos sem necessidade, com baixa temperatura de operação e o não desligamento dos equipamentos em áreas de uso esporádico. Essa situação é ainda mais grave em escritórios, pois há presença de uma grande diversidade de equipamentos no ambiente, dificultando o gerenciamento e o controle de todos. A instalação de um novo sistema de ar condicionado capaz de contornar problemas relacionados à dependência dos usuários demanda altos investimentos, mão de obra especializada e alterações na infraestrutura do prédio. Consequentemente, o retorno de investimento não será vantajoso para empresas ou pequenos comerciantes que desejam aumentar sua eficiência energética e reduzir custos com o consumo de energia.

Sendo assim, o estudo aqui apresentado visa propor um sistema composto por uma rede sem fio de sensores e atuadores desenvolvida com base no conceito de IoT. O sistema é aplicável em qualquer aparelho de ar condicionado, de qualquer marca e modelo, desde que seja regido via controle remoto. Por ser uma solução de baixo custo e de fácil instalação, a tecnologia proposta é uma alternativa a empresas ou instituições que queiram se manter atualizadas do ponto de vista tecnológico e que desejam eliminar os desperdícios de energia elétrica. Nesse sentido, o trabalho visa contribuir com o desenvolvimento de projetos de edifícios inteligentes fornecendo uma proposta de atualização tecnológica para edifícios já construídos.

1.1 MOTIVAÇÃO

Os sistemas de refrigeração são utilizados por diferentes ambientes e processos. Podemos citar, por exemplo, o condicionamento de ar em ambientes residenciais, prediais, hospitalares e industriais, bem como aplicações em processos produtivos, como produção de bebidas e armazenamento de produtos sensíveis a altas temperaturas, como medicamentos e alimentos. A climatização de ambientes também é amplamente utilizada para garantir o perfeito funcionamento de equipamentos eletroeletrônicos e contribui com a redução da umidade e da temperatura de ambientes como centros de processamento de dados (data centers) e subestações elétricas. Nesses tipos de ambientes, a alta temperatura e a umidade podem prejudicar a vida útil desses equipamentos, além de atrair pragas e insetos.

Tendo em vista a necessidade dos grandes consumidores de energia elétrica em buscar novas tecnologias com capacidade de redução do consumo energético e a importância dos sistemas de climatização em diferentes áreas, foi realizada uma parceria com a empresa Robert Bosch Ltda., situada em Campinas há mais de 60 anos. A empresa em questão apresenta um consumo anual de energia elétrica de aproximadamente 70 GWh, dos quais 27% são destinados aos sistemas de climatização.

De forma similar a shopping centers, universidades e escritórios, a refrigeração do ar nos ambientes administrativos da empresa acontece por meio de chillers centrais e é distribuída pelos escritórios através de cassetes de ar condicionado, que podem ser do tipo dutos ou aparentes. O acionamento do sistema é controlado por PLCs (Programmable Logic Controllers)

que comandam os períodos de distribuição de água refrigerada pelo sistema e controlam os dias e os horários em que a energia é fornecida aos cassetes de ar condicionado. Entretanto, esse tipo de controle não é capaz de realizar algumas ações automáticas, como ligar os aparelhos de ar condicionado pela manhã ou regular a temperatura de operação de cada ar condicionado, sendo que essas ações devem ser executadas via controle remoto, os quais apenas alguns usuários possuem acesso.

Diariamente, usuários com acesso ao controle remoto precisam ligar manualmente os cassetes de ar condicionado, cuja temperatura de operação recomendada é de 24 °C. Entretanto, em dias quentes, costuma-se alterar a temperatura de operação do ar condicionado para valores abaixo do recomendado, implicando em um aumento do consumo de energia elétrica. Além disso, se a temperatura de operação não for alterada no dia seguinte para o valor recomendado, esses aparelhos irão continuar a operar com uma temperatura de *set-point* abaixo da indicada. Após acionados, os cassetes de ar condicionado permanecerão ligados até o horário de desligamento de energia pré-estabelecido na configuração de software dos PLCs. Sendo assim, em salas de reunião ou em ambientes cuja ocupação se encerra em horários aleatórios, o desperdício de energia ocorre quando os aparelhos permanecem em uso em ambientes desocupados ou em períodos desnecessários.

Nesse sentido, os principais problemas a serem solucionados são:

1. A dependência de usuários para o acionamento dos cassetes de ar condicionado;
2. A dificuldade em manter um *set-point* de temperatura de operação padrão;
3. A falta de inteligência em um sistema incapaz de realizar tomada de decisões;
4. O aumento no consumo de energia elétrica quando o sistema trabalha para manter temperaturas abaixo do *set-point*;
5. A não existência de uma central de comando capaz de controlar todos os cassetes de ar condicionado.

1.2 OBJETIVOS

Neste trabalho de pesquisa será apresentada a metodologia utilizada durante o desenvolvimento de um protótipo empregado no controle de aparelhos de ar condicionado convencionais. Para realizar o desenvolvimento do protótipo foram utilizados princípios básicos de sistemas de climatização, conceitos de IoT e conhecimentos de eletrônica e programação.

O objetivo dessa pesquisa é contribuir com o desenvolvimento das tecnologias IoT capazes de melhorar o cotidiano das pessoas, propondo uma nova tecnologia que possa ser aplicada nos edifícios e que contribui para o aumento da eficiência energética. Para alcançar esse objetivo será necessário:

- Utilizar conceitos básicos de climatização;

- Estudar a teoria da Internet das Coisas;
- Identificar principais aplicações emergentes em edifícios;
- Buscar soluções simples e de baixo custo de implementação;
- Propor uma metodologia para desenvolvimento do protótipo;
- Avaliar a solução proposta por meio de estudo de caso em um escritório administrativo utilizado por cerca de 30 colaboradores e com uma área útil de aproximadamente 450m²;
- Estudar os resultados e propor melhorias para desenvolvimentos futuros.

1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Levando em conta a grande quantidade de artigos, livros e pesquisas desenvolvidas nos últimos anos que estão relacionadas com o conceito de Internet das Coisas e o avanço e a complexidade dos sistemas de climatização, para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o seguinte procedimento metodológico:

- a) Revisão bibliográfica de trabalhos: leitura de artigos, livros e pesquisas acadêmicas relacionadas ao desenvolvimento de tecnologias IoT e suas principais aplicações em edifícios. Uma pesquisa é necessária para identificar e analisar o crescimento exponencial das aplicações de IoT nas mais diversas áreas de atuação e avaliar como o usuário final tem se comportado em relação ao contato com essas novas tecnologias. Para garantir o sucesso do protótipo é preciso considerar a experiência do usuário e a relação que ele passará a ter com sistemas inteligentes capazes de tomar decisões que impactam diretamente a sua qualidade de vida.
- b) Estruturação da metodologia de desenvolvimento do protótipo: a partir da pesquisa bibliográfica e com base na tecnologia selecionada, foi estruturada uma metodologia de desenvolvimento do protótipo de forma a contemplar todas as fases de implementação de uma nova tecnologia IoT até a validação de seu conceito em aplicação de um estudo de caso.
- c) Aplicação em estudo de caso: a solução proposta será validada em um escritório administrativo e o impacto no cotidiano dos usuários será avaliado qualitativamente. A estimativa dos ganhos em eficiência energética será realizada por meio de dados teóricos.
- d) Análise de resultados da aplicação e do protótipo para identificar os pontos positivos e necessidades de melhoria, bem como diretrizes para eventuais ajustes.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação de mestrado aqui apresentada é dividida em cinco capítulos e anexos complementares. O primeiro capítulo traz uma visão geral do tema Internet das Coisas, apresentando o problema relacionado ao sistema de ar condicionado encontrado na maioria dos edifícios e descrevendo a aplicação de Internet das Coisas aqui proposta, bem como os seus principais objetivos e metodologia.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica. O capítulo contém uma breve introdução ao tema Internet das Coisas, explorando suas principais tecnologias e campos de aplicação. Em seguida, é realizada uma breve definição do conceito de edifícios inteligentes, bem como a evolução desse conceito ao longo do tempo. É dado destaque para os benefícios relacionados à introdução da IoT nas construções, sendo ilustrado por meio do exemplo de uma rotina do usuário de um edifício inteligente. Além disso, é feita uma breve análise dos sistemas de climatização encontrados no Brasil, dando destaque para o tipo de sistema utilizado durante o estudo de caso.

O terceiro capítulo apresenta as etapas de desenvolvimento do protótipo. O capítulo explora todos os processos de criação, contendo desde uma breve introdução ao microcontrolador utilizado, até a apresentação dos softwares de programação utilizados, circuitos elétricos elaborados para teste e códigos de programação.

O quarto capítulo apresenta o estudo de caso e os resultados coletados durante a aplicação do sistema. Além disso, são apresentadas as etapas percorridas durante a pesquisa para que a tecnologia demonstrasse ser inovadora o suficiente para conquistar um depósito de patente.

No quinto capítulo são apresentadas as principais conclusões deste trabalho de pesquisa e as perspectivas e oportunidades de melhoria para trabalhos futuros relacionados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Considerando a grande complexidade do tema IoT, bem como as inúmeras aplicações sob desenvolvimento nesse tema, procurou-se encontrar referências que abordassem aplicações voltadas para o campo dos edifícios. Este capítulo é dividido em três partes, sendo a primeira parte voltada para uma explicação do conceito de Internet das Coisas, sua origem, principais tecnologias envolvidas, campos de aplicação e os principais desafios. A segunda parte tem como foco a área de aplicação dos edifícios inteligentes, abordando a evolução do conceito de inteligência nos edifícios, arquitetura de desenvolvimento e algumas aplicações utilizadas. Na terceira e última parte do capítulo são explicados brevemente os principais tipos de sistemas de climatização encontrados no mercado brasileiro, os principais pontos de melhoria encontrados e uma breve introdução aos benefícios que a tecnologia apresentada nesta pesquisa procura trazer ao propor uma solução capaz de atribuir inteligência a sistemas convencionais de ar condicionado.

2.1 INTERNET DAS COISAS

O termo Internet das Coisas foi mencionado pela primeira vez por Kevin Ashton, um dos fundadores do centro Auto-ID do MIT, em 1999. Na ocasião, o autor refletiu sobre a possibilidade de computadores terem o conhecimento de tudo o que fosse possível saber sobre o ambiente ao seu redor sem necessitar do auxílio e da intervenção dos usuários. Dessa forma, segundo o autor, seria possível reduzir perdas, custos e desperdícios. Também foi imaginada a necessidade de potencializar os computadores, de forma que eles pudessem ver, ouvir, cheirar e compreender o mundo por si mesmos [7].

Outras definições, como a presente em [8], classificam a IoT como o instante no tempo em que o número de objetos ou coisas conectadas à Internet excedeu o número de seres humanos na Terra, e isso ocorreu entre os anos 2008 e 2009. Segundo a pesquisa, a expectativa é de que em 2025 o número de dispositivos conectados à internet via algum IP seja em torno de 50 bilhões.

Segundo a definição encontrada em [9], a internet das coisas trata da construção de uma rede de infraestrutura dinâmica e global capaz de se autoconfigurar com base em padrões e protocolos de comunicação, nos quais coisas virtuais e físicas possuem identidade, atributos, personalidade virtual e interfaces inteligentes para se integrar à rede de informação. Dentro do universo da IoT, os objetos ou coisas inteligentes se tornarão participantes ativos nos negócios, na troca de informações e em processos sociais. Esses objetos inteligentes são caracterizados pela habilidade de interação e comunicação entre si através da troca de dados ou informações capturadas por meio de sensores eletrônicos que convertem os sinais analógicos do ambiente

em sinais digitais. Ao mesmo passo, esses objetos são capazes de comandar dispositivos atuadores que atuam de volta no ambiente, ativando processos, ações ou reações sem a necessidade da intervenção humana.

Embora não exista uma definição clara e livre de ambiguidades sobre IoT, o tema é alvo de pesquisas científicas e estudos econômicos ao redor do mundo. Do ponto de vista econômico, o potencial impacto global da IoT para o ano de 2025 é previsto entre \$3,9 e \$11,1 trilhões de dólares [10]. Os dispositivos conectados irão assumir formatos que vão além de tablets e celulares, podendo integrar, por exemplo, pílulas a serem ingeridas com o objetivo de monitorar a saúde, relógios inteligentes que acompanhem a rotina e mantenham as pessoas conectadas a serviços, como redes sociais, ou dispositivos integrados aos edifícios inteligentes, tópico destacado nesta pesquisa.

2.1.1 Tecnologias IoT

As aplicações em IoT exigem que dados sejam coletados, processados, transformados em informações e compartilhados entre os objetos conectados à mesma rede. Para que essas funções sejam executadas, são utilizados hardwares, softwares e tecnologias de processamento de dados, cada uma com uma função específica dentro de um contexto maior. De acordo com [6], podemos classificar as tecnologias utilizadas em três tipos: tecnologias de detecção e coleta de dados, tecnologias de comunicação de dados e tecnologias de armazenamento e análise de dados. O detalhamento a seguir visa explorar cada um dos três tipos de tecnologias existentes e servirá como base na escolha de hardwares ou softwares a serem utilizados durante o desenvolvimento do protótipo.

2.1.1.1 Tecnologias de detecção e coleta de dados

De forma geral, podemos definir que as tecnologias de detecção e coleta de dados são responsáveis pela coleta de informações do ambiente físico (como, por exemplo, os sensores de temperatura, umidade e luminosidade) ou sobre objetos (identidade, estado, nível de energia). Dentro desse contexto, podemos citar três principais tecnologias que contribuem para essas atividades.

A tecnologia RFID (*Radio Frequency Identification*) tem sua origem relacionada à necessidade de identificar aviões, aliados ou inimigos, durante a Segunda Guerra Mundial [11]. O primeiro identificador ativo de aviões capaz de rastrear aeronaves inimigas ou amigas foi desenvolvido pelo comando do físico escocês Sir Robert Alexander Watson-Watt. O sistema era baseado em um transmissor instalado em cada avião inglês que recebia sinais enviados das estações de radar no solo e transmitia de volta um sinal de resposta à estação, identificando a

aeronave como amiga. Os sistemas atuais de RFID utilizam esse mesmo princípio básico para permitir a identificação de objetos, pessoas ou animais, armazenando informações sobre eles, transferindo essas informações para outros dispositivos eletrônicos via comunicação sem fio. Os sistemas de RFID são constituídos por etiquetas, ou “tags”, aplicadas diretamente ao objeto que o identificam por meio de código eletrônico de produto (EPC – *Electronic Product Code*). Esses códigos são lidos através de um leitor que coleta os dados das tags e os transmite, por exemplo, via internet. Os sistemas RFID são classificados como passivos ou ativos.

Os sistemas RFID passivos não possuem fontes de alimentação e respondem ao sinal enviado pela base transmissora. As etiquetas passivas são muito acessíveis porque são pequenas, baratas e com vida potencialmente longa. Sua principal desvantagem é a curta distância entre leitores e etiquetas (aproximadamente 3 metros). Nos sistemas de RFID ativos, as etiquetas são equipadas com sua própria fonte de alimentação, o que permite um maior alcance de comunicação. A duração da bateria afeta a vida útil dessas etiquetas, que podem realizar a transmissão em 4 bandas de frequências:

- Baixa frequência (*Low Frequency – LF*): 125/134 kHz e 140/148.5 kHz;
- Alta frequência (*High Frequency – HF*): 13,56 MHz;
- Ultra alta frequência (*Ultra High Frequency – UHF*): 915 MHz (USA), 868 MHz (Europa) e 2,4 GHz e superior, no caso das tags micro-ondas.



Figura 1. Etiquetas RFID: Sistemas passivos e ativos. (Elaborado pelo autor).

As redes de sensores sem fio ou WSN (*Wireless Sensor Networks*) são redes formadas por dispositivos com capacidade de sensibilidade e comunicação sem fio, sendo capazes de monitorar e medir certas condições físicas e ambientais em diferentes ambientes. Essa rede é composta por nós sensores, dispositivos autônomos compostos por um microcontrolador, uma fonte de energia, um transmissor-receptor de rádio frequência e um sensor [12]. Com a tecnologia WSN é possível construir redes sem infraestrutura física programa ou administração central. Os nós da rede podem ser configurados para agir como transmissores, receptores ou roteadores. A topologia é dinâmica, sendo capaz de possuir autoconfiguração, autorrestauração e alta confiabilidade (se um nó falhar, a rede é capaz de encontrar novas formas para encaminhar os pacotes de dados). Vale destacar que, com o passar do tempo, o preço dos componentes necessários para a construção de uma rede de sensores sem fio decresceu, fazendo com que essa seja uma tecnologia de custo relativamente baixo.

A tabela abaixo, adaptada de [6], apresenta um resumo das principais características das tecnologias RFID e WSN:

Tabela 1. Principais características das tecnologias de detecção e coleta de dados RFID e WSN.

Tecnologia	Aplicações	Capacidades	Taxa de dados	Distância máxima	Padrões de referência	Aplicações
RFID	Etiquetas de Livros/CD/DVD, compartilhamento de carros, passaportes, bagagens	Identificação, armazenagem, comunicação	Até 640 kbps	3-10 m	ISO/IEC 18000	Transportes, logística, rastreamento, identificação de animais, controle de acesso, pagamentos.
WSN	Sensores para monitoramento de ambientes, sensores pessoais, câmeras digitais.	Sensoreamento, armazenagem, processamento e comunicação.	250 kbps	10-100 m	IEEE 802.15.4, ZigBee, Wireless HART, ISA 100	Saúde/Meio ambiente/Monitoramento industrial, Agricultura inteligente, Vigilância

2.1.1.2 Tecnologias de comunicação de dados

As tecnologias de comunicação de dados configuram a forma como a transmissão de dados ocorre em uma determinada aplicação. De forma simples, elas podem ser classificadas em duas principais categorias: com ou sem fio. As tecnologias com fio demandam uma infraestrutura física adequada para a passagem de cabos e fios. A necessidade de conectar fisicamente os dispositivos para permitir a comunicação é dispendiosa e exige esforços em casos de manutenção, expansão, remoção ou atualização dos cabos utilizados. A principal vantagem é que as transmissões que ocorrem por meio de redes cabeadas são confiáveis e robustas porque são menos suscetíveis a erros e interferências do meio ambiente. Dentre as principais classes de cabos utilizados, podemos citar o cabo coaxial (até 20Mbps), cabo de cobre – par trançado (30 Mbps) e a fibra ótica (até 100 Mbits). A especificação padrão IEEE 802.3 para Ethernet é utilizada para especificar os meios físicos e as características de funcionamento de uma rede de área local ou LAN (Local Area Network) [13].

Por outro lado, o padrão IEEE 802.11 a/b/g/n estabelece padrões para a comunicação sem fio (WiFi) por meio do controle de acesso ao meio (*Media Access Control* - MAC) e protocolos de camada física (*Physical Layer* - PHY) [14]. A tecnologia WiFi pode operar em faixas de frequências diferentes (2,4 GHz ou 5 GHz) através da implementação de diferentes esquemas de modulação e alcançando uma distância de até 100 m com 54 Mbps. Dentre as principais vantagens da comunicação WiFi está a compatibilidade nativa para redes IP, facilitando a construção de redes IoT e uma integração mais simples com redes locais (LAN). Entretanto, a compatibilidade de forma nativa com IP prejudica o tempo de vida útil das baterias porque, ao contrário de outras tecnologias, é necessário a realização de conexões regulares.

Outra alternativa de tecnologia utilizada para a transferência de dados sem fio é a especificação ZigBee. As redes Mesh ou redes em malha, são uma alternativa ao protocolo 802.11

para a transferência de dados. O alcance da rede é aumentado ao permitir que dados circulem de um nó para o outro da rede e a confiabilidade é fortalecida pela capacidade de autoconfiguração que permite a criação de caminhos alternativos para a transmissão de dados quando ocorre a falha em um dos nós ou a conexão é perdida. O ZigBee é um protocolo de rede Mesh baseado na especificação IEEE 802.15.4 projetado para aplicações com baixa transferência de dados e baixo consumo. O protocolo ZigBee é um protocolo aberto que define três tipos de nós: coordenador, roteador e dispositivo final, com a necessidade de um coordenador para cada rede. Mesmo que todos os nós sejam capazes de receber dados, cada um possui uma finalidade específica. O coordenador é o dispositivo responsável por configurar a rede, armazenando informações de configurações, como senhas de segurança. Os roteadores são os dispositivos intermediários necessários para transmitir dados a outros dispositivos. Os dispositivos finais são responsáveis por conversar com o seu nó pai (coordenador ou roteador) e não podem transmitir dados de outros dispositivos. A figura abaixo, adaptada de [15], ilustra uma possível configuração de rede ZigBee.

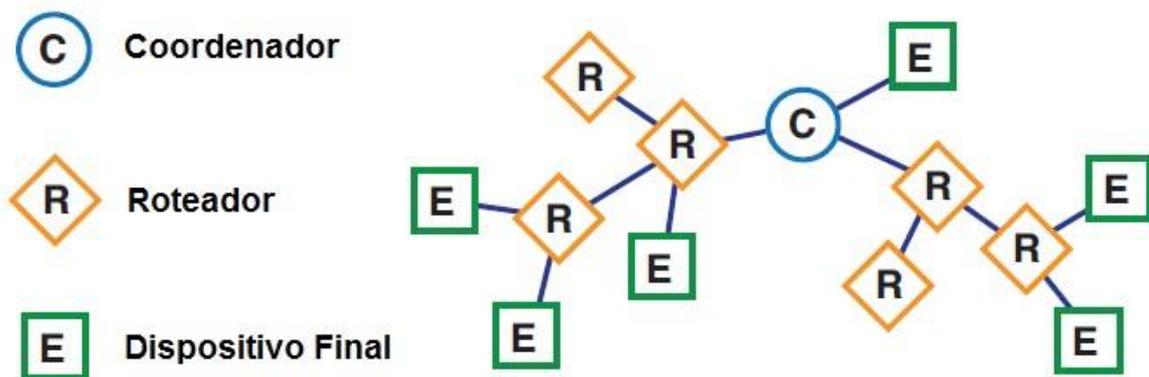


Figura 2. Exemplo de configuração de uma rede ZigBee. Adaptado de [15].

Paralelamente ao protocolo ZigBee, a empresa Digi International desenvolveu um protocolo alternativo para redes do tipo Mesh, denominado DigiMesh. O protocolo DigiMesh possui apenas um tipo de nó, sendo que todos os nós da rede são capazes de rotear os dados entre si, sem existir uma relação de hierarquia entre os nós da rede. Todos os dispositivos também podem ser configurados para um modo de baixo consumo de bateria. Essa estratégia facilita a configuração, a flexibilidade e a expansão da rede, com maior confiabilidade em ambientes onde roteadores podem sofrer interferências ou danos. A figura 3, adaptada de [15], ilustra a configuração de uma rede DigiMesh.

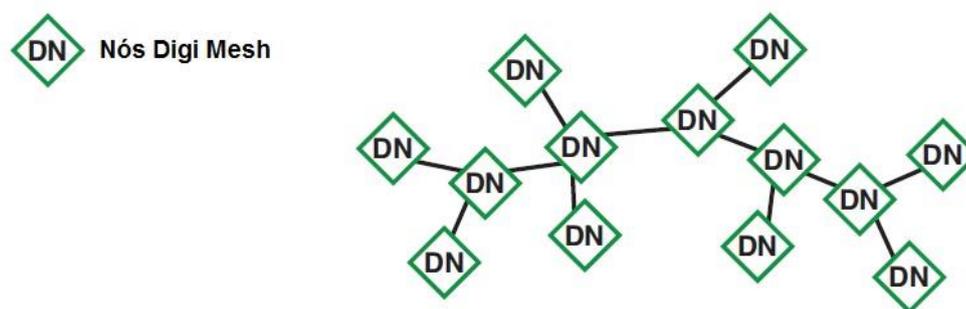


Figura 3. Exemplo de configuração de uma rede DigiMesh. Adaptado de [15].

2.1.1.3 Tecnologias de armazenamento, análise e utilização de dados

As tecnologias de armazenamento, análise e utilização de dados englobam as aplicações IoT, a análise e o gerenciamento de dados e as plataformas de aplicativos. De forma geral, podemos dizer que as aplicações IoT são os softwares em execução que coordenam a interação entre pessoas, sistemas e dispositivos no contexto de um determinado propósito. Essas aplicações permitem a interação dispositivo-dispositivo e humano-dispositivo de forma confiável e robusta. A comunicação entre duas ou mais entidades sem necessitar da intervenção direta do ser humano, como descrita em [16], recebe o nome de *Machine-to-Machine* (M2M). Como observado no estudo, as aplicações IoT devem ser elaboradas de modo que os dispositivos possam monitorar o ambiente, identificar problemas, comunicar-se entre si e resolver os problemas sem necessidade da intervenção humana. É possível observar também que as aplicações IoT precisam garantir que todas as mensagens ou dados foram recebidos e aplicados adequadamente em tempo hábil. Além disso, as aplicações de dispositivo para dispositivo não requerem necessariamente a visualização de dados. Entretanto, as aplicações voltadas ao usuário devem ser capazes de apresentar as informações ao usuário final por meio de uma interface intuitiva e fácil para permitir a sua interação com o meio ambiente.

O desenvolvimento de aplicações IoT é realizado através das plataformas de aplicativos, que permitem a integração entre dispositivos (Arduino, Raspberry, Beagle) ao oferecer meios de conectividade, análise de dados, armazenamento dos dados e serviços de segurança. Entre as plataformas de aplicações existentes, podemos citar os serviços oferecidos pelas empresas Carriots, ThingSpeak e BlueLabs.

As aplicações IoT necessitam do armazenamento massivo de dados, grande velocidade de processamento para permitir a tomada de decisões em tempo real e redes de banda larga de alta velocidade para transmitir dados, áudio ou vídeo. Como destacado em [17], os recursos virtuais de computação e armazenamento, também conhecidos como “nuvem”, são o ambiente das aplicações IoT. A nuvem pode ser classificada como nuvem privada, pública ou híbrida. A escolha do tipo de nuvem depende do projeto e dos recursos disponíveis. As nuvens privadas são compradas ou alugadas, sendo localizadas dentro do próprio cliente (não necessariamente

dentro do ambiente físico, mas dentro do firewall local) e é totalmente gerenciada por seus funcionários ou prestadores de serviços. As nuvens públicas são compartilhadas e os custos são rateados entre as empresas ou aplicações que as utilizam. Já as nuvens híbridas são composições entre nuvens privadas e públicas. A grande quantidade de dados gerados pela IoT será a primeira fonte de informação para técnicas de controle, gestão e análise de grandes quantidades de dados que não podem ser analisados no modo tradicional, conhecidos como *Big Data*. A computação em nuvem permite que empresas mantenham um data center virtualizado, liberando espaço físico para outras utilizações e terceirizando custos como manutenção em servidores e atualizações de firmware, hardware e software.

2.1.2 Áreas de aplicações para Internet das Coisas

Uma vez conhecidos os recursos necessários para o desenvolvimento de soluções baseadas em IoT, é possível observar como esse novo conceito irá beneficiar a sociedade e impulsionar o mercado. A IoT cria uma rede invisível de comunicação que pode ser programada e controlada para sentir o ambiente ao seu redor. A IoT também progride na direção de uma rede de comunicação que envolve a sociedade, processos, dados e objetos, fenômeno que também recebe o nome de *Internet of Everything* ou IoE [18]. Essa definição é traduzida na capacidade que essas tecnologias possuem de conectar as pessoas de uma forma mais relevante, entregando as informações corretas para as pessoas certas no instante adequado. Do ponto de vista de dados e objetos, esse novo conceito tecnológico possibilita que a coleta de dados seja transformada em informações úteis a serem fornecidas para os dispositivos e objetos interligados, possibilitando a tomada inteligente de decisões. Nesse sentido, a IoT tem potencial para o desenvolvimento de novas aplicações inteligentes em praticamente todos os campos.

Classificando os domínios de aplicações em três principais grupos – industrial, cidades inteligentes, e saúde e bem-estar – é possível identificar potenciais aplicações dentro de cada um deles. A tabela 2, adaptada de [6], traz um resumo das principais aplicações identificadas até o momento, classificadas em três principais domínios e seus respectivos grupos.

Tabela 2. Campos de aplicação da IoT.

Domínio	Grupo	Aplicação
Indústria	Agricultura e Pecuária	Rastreamento de animais, certificações e controle comercial. Irrigação, monitoramento de produção e alimentação. Gerenciamento de fazendas.
	Logística e gerenciamento de produtos	Identificação de produtos/materiais/bens e perecimento de produtos. Gerenciamento de estoque, produtos de varejo e inventário. Operações de compras e pagamentos rápidos
	Processo Industrial	Diagnóstico de veículos em tempo real/direção assistida. Processos de fabricação. Gerenciamento de bagagens/ Serviços de embarques e passagens. Monitoramento de plantas industriais.
Cidades Inteligentes	Mobilidade e Turismo	Sistemas de pagamentos, entretenimento e guias turísticos. Monitoramento das condições de estradas, estacionamentos e coleta de lixo. Gerenciamento do tráfego. Carro/Bicicletas/Vans compartilhadas. Transporte multimodal.
	Redes Inteligentes	Geração Distribuída. Armazenamento energia. Gerenciamento da demanda. Serviços de entretenimento. Mobilidade sustentável, pontos de recarga, reconhecimento clientes.
	Edifícios e casas inteligentes	Entretenimento, conforto. Vigilância, controle de acesso, proteção de crianças. Manutenção, ar condicionado, iluminação, irrigação. Gerenciamento de consumo Aplicações BIM (Building Information Modeling)
Saúde e Bem-Estar	Saúde Pública e Meio Ambiente	Resgate / Emergências / Rastreamento de pessoas / Planos de Emergência. Monitoramento de territórios e meio ambiente Vigilância por vídeos, radar e satélite.
	Medicina e saúde	Assistência a idosos e pessoas com necessidades especiais. Inclusão social, assistência doméstica. Bem-estar do indivíduo, comportamento e impacto na sociedade. Monitoramento remoto, parâmetros médicos e diagnósticos. Rastreamento e equipamentos médicos. Controle de acessos. Serviços de hospitais inteligentes, entretenimento.

Dentre os grupos apresentados na tabela, é possível observar que esta pesquisa tem como foco a área de concentração dos edifícios e casas inteligentes, principalmente nas aplicações voltadas para os aparelhos de ar condicionado. Em especial, procura-se disponibilizar para a comunidade uma tecnologia IoT de baixo custo. A proposta é realizar o reaproveitamento de investimentos já realizados em sistemas de climatização que possuam algum nível de automação.

Apesar do grande avanço tecnológico, a troca de sistemas completos de climatização requer um alto investimento por parte dos proprietários. Muitas vezes, empresas e proprietários desejam acompanhar as novas tendências tecnológicas disponíveis no mercado, mas acabam por não realizar tal troca por falta de viabilidade do ponto de vista econômico. A solução proposta tem como objetivo agregar o conceito tecnológico de IoT a sistemas já existentes, trazendo inteligência a sistemas convencionais. O conceito de inteligência aplicada a edifícios faz parte de um novo movimento que procura aprimorar a qualidade do ambiente em questão, denominado edifícios inteligentes. A seguir, é feita uma breve apresentação sobre esse conceito, suas áreas de aplicações e um exemplo que procura ilustrar a sua rotina.

2.2 DEFINIÇÃO DO TERMO “EDIFÍCIOS INTELIGENTES”

Nos últimos 100 anos a porcentagem da população mundial que vive nas cidades saltou de 10% para mais de 50%, sendo que a expectativa é de que, em 2050, 75% da população mundial esteja morando nas cidades [19]. Ao longo do início do século XXI, megacidades como Tóquio, Cidade do México, Nova Iorque e São Paulo trouxeram à tona o enorme desafio do desenvolvimento sustentável, a ser definido como a necessidade de garantir as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades [20]. Como consequência da necessidade de garantir conforto e recursos a uma população urbana mundial de mais de 3,6 bilhões de habitantes, os edifícios são hoje os maiores consumidores de energia em escala mundial, correspondendo a 40% do consumo mundial de energia e consumindo 50% da energia elétrica final disponível no mundo [1].

O ambiente urbano é o principal palco para a introdução de tecnologias e políticas que possam contribuir com a redução do consumo de energia e o aumento da eficiência energética dos serviços disponíveis. Os edifícios são o principal consumidor de energia nas cidades, sendo foco de diversas pesquisas e aplicações desenvolvidas para garantir o conforto dos usuários de forma mais eficiente.

Conforme apontado em [21], o termo “edifícios inteligentes” vem sendo usado há mais de duas décadas. Durante a segunda metade da década de 1970, o termo fazia referência a edifícios construídos com base nos conceitos de eficiência energética; em 1980, passou a ser utilizado para se referir a construções que pudessem ser controladas através de um computador. O avanço tecnológico tornou possível a construção de edificações capazes de gerenciar sua infraestrutura e serviços - como iluminação ou sistemas de climatização - de uma forma mais eficaz

e autônoma, utilizando como base para a tomada de decisões algumas configurações pré-definidas via software.

Atualmente, um novo conceito de aplicações surge devido aos avanços nos campos da eletrônica e nos sistemas de comunicação. Ao longo da última década, o desenvolvimento de dispositivos e equipamentos visam novas formas de interligação entre o mundo físico e o digital.

A combinação entre poder computacional e redes de comunicação tornou possível o desenvolvimento de aplicações capazes de perceber e interpretar o mundo real. Através de sensores, sinais analógicos presentes no mundo real são convertidos em dados digitais a serem processados localmente ou transmitidos para alguma fonte computacional de processamento. A análise desses dados permite a tomada de ações no mundo real por meio de atuadores, caracterizando um controle realimentado capaz de gerenciar a dinâmica de diversos sistemas. O avanço das Tecnologias da Informação e Computação (TIC) e o surgimento de conceitos como o da Internet das Coisas possibilitaram agregar inteligência a soluções de sistemas digitais.

Os edifícios e as casas do futuro serão caracterizados pela presença de inúmeros sensores e dispositivos inteligentes (roteadores, smartphones, televisores, eletrodomésticos, tomadas inteligentes, sistemas de vigilância, luminárias, janelas e fachadas, termostatos, medidores de potência). Uma vez integrados através de uma infraestrutura comum de comunicação, essas tecnologias irão impactar positivamente a rotina dos usuários, aumentando a qualidade dos serviços de infraestrutura e possibilitando um melhor gerenciamento energético. Algumas das principais áreas de pesquisa e suas respectivas aplicações em sistemas prediais são:

- Automação residencial ou predial: surgimento de novos sistemas de controle remoto via aplicações web, possibilitando o gerenciamento e aumento da eficiência do uso de utilidades como iluminação, climatização, ar comprimido e consumo de água.
- Serviços de segurança e monitoramento: melhoria nos sistemas de vigilância, controle de acessos e detecção de intrusões.
- Gerenciamento de infraestrutura e manutenção: novos dispositivos capazes de detectar defeitos ou falhas de equipamentos, faltas de energia ou realizar previsões de trocas de equipamentos otimizando a manutenção preventiva e o agendamento automático de reparos.
- Gerenciamento energético: investiga se o edifício e os seus recursos instalados apresentam o consumo inicialmente projetado, monitoramento da eficiência energética das instalações, acompanhamento de performance ao longo da vida útil, economia de energia por meio da combinação de operações, avaliação e atuação em busca do ponto ótimo entre conforto e consumo energético.

O diagnóstico das novas aplicações possibilitadas pelo avanço das pesquisas em TIC e, especialmente na área de IoT, permite observar que o conceito de edifício inteligente também evoluiu com o passar do tempo. No presente momento, são inúmeras as definições encontradas na literatura [22]. Entretanto, é importante compreender o que de fato é considerado inteligência quando estamos nos referindo aos sistemas prediais.

Vamos tomar como base de referência uma casa ou um prédio onde os sistemas de iluminação, climatização e eletrodomésticos são controlados remotamente pela internet por meio de um aplicativo instalado em um smartphone. Tal sistema permite que o usuário realize diversos comandos, como ligar e apagar das luzes, controlar o acionamento do sistema de climatização, ou até mesmo iniciar a cocção de uma refeição antes que o usuário chegue em sua residência. Em todos esses casos nota-se uma relação de dependência entre a tomada de decisões por parte do usuário e as ações executadas. É necessário a intervenção do indivíduo, que determina e envia a ação desejada ao sistema de automação. Sendo assim, é importante distinguirmos prédios com alto nível de automação (como o descrito acima) e os edifícios inteligentes. Ao invés de serem programados para executar ações, os edifícios inteligentes possuem a capacidade de autoprogramação, tendo como base para a tomada de decisões certas informações como o monitoramento do ambiente, seja através de padrões de ocupação, valores de temperatura ou de iluminância.

Como apontado em [23], a definição de um edifício inteligente engloba o conjunto de sistemas dinâmicos e inteligentes instalados em um edifício, capazes de armazenar, produzir, compartilhar, analisar e atuar com base nos dados coletados. O sistema instalado é capaz de aumentar a eficiência energética de suas ações com o passar do tempo por meio do aprendizado com as ações que produziram os melhores resultados. Além disso, o sistema é capaz de otimizar a performance em diferentes aspectos: segurança, eficiência energética, produtividade, operação eficiente, consumo eficiente, entre outros.

Além dos benefícios entregues aos usuários diretos, os edifícios inteligentes irão intensificar as relações existentes entre os prédios e a cidade. A troca bilateral de energia entre prédio e cidade será consequência do avanço tecnológico das redes elétricas inteligentes, conhecidas como *smart grid*. Conforme analisado por [24], as redes elétricas inteligentes integram as tecnologias da informação e comunicação com a rede elétrica atual, possibilitando novas vias de comunicação entre usuários e empresas distribuidoras. Além disso, com o surgimento e uso dos medidores inteligentes de energia elétrica, novas fontes de eletricidade serão introduzidas por meio da geração distribuída proveniente de painéis fotovoltaicos ou miniparques eólicos. Uma vez conectados à infraestrutura da cidade, os edifícios passam a assumir o papel de consumidor-gerador, colaborando com o aumento da qualidade de energia e acelerando o tempo de resposta do sistema elétrico nos horários de pico. Utilizando como base os aspectos positivos de cada uma das definições encontradas na literatura, nesta pesquisa iremos definir um edifício inteligente como sendo um edifício que fornece conforto, segurança e os recursos necessários aos usuários por meio de sistemas dinâmicos responsivos, intercomunicáveis entre si e integrados à cidade. Seus sistemas interagem com os usuários, prevendo suas necessidades e fornecendo informações acerca do uso de suas utilidades.

2.2.1 Arquitetura para desenvolvimento de um edifício inteligente

A construção de um edifício inteligente deve atender alguns requisitos, como: estabelecer sinergia entre os diversos componentes e dispositivos instalados no edifício, atender e gerenciar diferentes demandas, garantir a segurança de informação e de pessoas, estabelecer uma conectividade à infraestrutura da cidade e prever as principais necessidades dos usuários [25]. Para realizar o projeto de um edifício inteligente é necessário seguir uma arquitetura de desenvolvimento que compreenda os seguintes pontos:

1. Heterogeneidade
2. Autorreparo
3. Sensibilidade ao contexto
4. Praticidade
5. Segurança e privacidade de informações

2.2.1.1 Heterogeneidade

A comunicação M2M (*Machine-to-Machine*) acontece entre dois ou mais dispositivos sem a necessidade de intervenção direta do ser humano. Essa comunicação é premissa para aplicações IoT e, conseqüentemente, para as novas possibilidades de soluções a serem utilizadas no campo de aplicações dos edifícios. A proliferação de redes sem fio de sensores e atuadores (WSN – *Wireless Sensor Network*) possibilitou a conectividade de comunicações M2M. As redes WSN, conforme analisado anteriormente, são caracterizadas pelo seu baixo custo, baixo consumo e autoconfiguração.

As redes WSN podem ser construídas envolvendo diversos dispositivos e protocolos. Por exemplo, os protocolos ZigBee e Z-Wave são os mais comuns para aplicações em residências. Por muito tempo, redes com comunicação Bluetooth permitiam a conexão de até sete dispositivos limitados a uma distância de até 100 metros entre eles. Entretanto com o surgimento do *Bluetooth Low Energy* (BLE) 4.1, redes do tipo mesh podem ser construídas e competem com outros protocolos disponíveis no mercado.

A maioria das redes WSN requerem alguma forma de transmitir os dados de ou para a internet. Essas conexões podem ser feitas de diversas maneiras, sendo possível o uso de redes de celulares (conexões 3G, LTE, EDGE), ou outras novidades como 6LoWPAN que possibilita conectividade direta à internet através de IPv6 para um número limitado de nós.

A heterogeneidade, portanto, trata da necessidade de conectar os diversos dispositivos existentes dentro de uma mesma rede de comunicação, seja ela com ou sem fio. Uma rede residencial heterogênea típica é composta por diferentes dispositivos (sensores, gateways e atuadores), conectados por diferentes formas de comunicação entre si e possuindo interação entre

eles. De acordo com [26], as heterogeneidades podem ser classificadas em três níveis de interoperabilidade: entre dispositivos, garantindo a comunicação entre eles; entre diferentes redes e com transmissão de dados entre elas; e a chamada interoperabilidade sintática, que se refere ao nível de aplicação.

O edifício inteligente deve ser flexível o suficiente para que não ocorram problemas de comunicação durante a troca de informações entre os seus dispositivos. Sendo assim, um bom projeto deve ser capaz de operar com a heterogeneidade dos diversos sistemas que compõem a inteligência do edifício.

2.2.1.2 Sensibilidade ao contexto

Sensibilidade ao contexto se refere à capacidade de reação com base em alterações físicas (mudança no posicionamento do objeto ou modificações de estado) ou alterações no ambiente ao seu redor, como temperatura, presença de dispositivos, sons e iluminação. Ser sensível ao contexto possibilita a reação em tempo real.

A onipresença da informática no cotidiano das pessoas, conhecida como computação ubíqua, foi possível graças à popularização e aumento do uso de dispositivos como os smartphones. Essa popularização abriu novos horizontes de aplicações em diversos campos. No caso dos edifícios, é possível saber a localização das pessoas através dos seus celulares, o que permite a readequação instantânea do prédio conforme a passagem ou a permanência de pessoas. Por exemplo, um usuário que carrega em seu bolso um celular com Bluetooth é detectado por um módulo sensor ao entrar em uma sala. O protocolo de reconhecimento realiza a autenticação desse usuário e automaticamente realiza uma verificação de controle do acesso do mesmo, podendo alertar a segurança local ou bloquear a sua entrada. Ao ter acesso às pessoas que estão utilizando determinado ambiente, o sistema de gerenciamento predial é capaz de traçar as melhores condições de iluminação e climatização com base nos aspectos físicos desses usuários (sexo, altura, peso) e com base nas atividades a serem realizadas na sala (reunião, workshops, feiras, concursos, pesquisas computacionais). A modelagem instantânea das utilidades é uma forma eficaz de garantir o uso correto dos recursos prediais evitando desperdícios e aumentando a eficiência energética do prédio como um todo.

Sendo assim, pode-se observar que a sensibilidade ao contexto é a base para a construção da inteligência de um edifício. Para que essa sensibilidade seja possível, algumas pesquisas como [27] demonstram a capacidade de captura de atividades por meio da eletrônica flexível instalada em relógios, etiquetas ou cartões. Outra alternativa, como a apresentada em [28], mostra que é possível reconhecer características emocionais através de câmeras por meio do reconhecimento de padrões faciais, postura e gestos. Além disso, [29] aponta que a análise de tre-

chos de áudio e a interpretação de amplitudes e da energia do som também permite o reconhecimento de certas emoções. Sendo assim, o edifício poderia, por exemplo, ser capaz de acionar o departamento médico do prédio ou chamar uma ambulância ao detectar um mal-estar de saúde em um de seus usuários, ou então acionar órgãos de segurança em casos de conflitos, agressões, assédios ou roubos. Ser capaz de interpretar as emoções dos usuários também é uma maneira de se avaliar o nível de conforto das pessoas e avaliar quais configurações resultam no bem-estar dos mesmos.

2.2.1.3 Praticidade

O critério de usabilidade ou praticidade está intimamente relacionado à teoria da interação homem-máquina e a forma como os humanos e as máquinas influenciam e são influenciados uns pelos outros [30]. O avanço tecnológico deve ter como objetivo a melhora na qualidade de vida das pessoas, sendo que a usabilidade da tecnologia desempenha um papel importante para que isso ocorra. A melhoria da interface entre homem e máquina é um dos principais objetivos durante o projeto de uma nova solução. Uma falha de sincronização entre o avanço tecnológico e o avanço na interface pode comprometer o sucesso de novas tecnologias ou aplicativos. A forma como os humanos interagem com seus celulares, computadores, tablets ou outros meios de mídia está cada vez mais intensa e tornou-se uma atividade diária, conforme resultados da pesquisa [31].

Nos edifícios, as operações são normalmente realizadas através de consoles como computadores, monitores, projetores ou televisores associados a teclados, mouses, telas sensíveis ao toque ou controle remotos. Entretanto, algumas pesquisas são feitas visando tornar menos visível a presença do computador durante as atividades de controle, através de sistemas compactos e embarcados com câmeras, sensores, microfones e outros sensores, ou até mesmo agrupar todas as funções de controle em smartphones.

Os novos recursos tecnológicos disponibilizados pelo avanço das tecnologias de informação e computação possibilitam novas formas de interação entre homem e máquina. A sensibilidade ao contexto permite que a captação de comandos por voz se torne um meio natural para comandar ações em um prédio. O desafio tecnológico está no fato de que o sistema de captura de voz do prédio deve ser sensível o suficiente para captar a voz em qualquer local ou pelo menos na maioria das áreas.

A realidade virtual surge como uma forma mais intuitiva de interação entre o ser humano e o ambiente através da tradução de informações digitais em ações num ambiente virtual capturado por câmeras. Usuários podem simular passeios em ambientes virtuais e interagir com objetos que reproduzem o ambiente real. A detecção de gestos e movimentos por algoritmos de inteligência artificial possibilita que idosos ou pessoas com necessidades especiais, por exemplo, possam realizar ações predefinidas. Sendo assim, a tecnologia agregada nos edifícios inteligentes deve ser vista como uma ferramenta para garantir a acessibilidade. Ela deve ser capaz

de permitir a execução de tarefas domésticas simples pelo público visado, garantindo a sua qualidade de vida e sua independência.

Além dessas possibilidades, a popularização das redes sociais e o aumento da sua importância no cotidiano das pessoas torna possível a união dos serviços oferecidos pelos edifícios inteligentes e as plataformas sociais. Ao integrar as redes sociais à infraestrutura predial, é possível enviar alertas através das redes sociais para os moradores de uma determinada residência ou para as pessoas que trabalham no mesmo prédio, indicando condições de uso das utilidades ou informando sobre a situação de trânsito ou as vagas de estacionamento. As novas formas de interação entre homem e máquina são objeto de pesquisa que tem como objetivo aproximar e aprimorar as relações existentes entre os usuários e as utilidades dos edifícios inteligentes.

2.2.1.4 Segurança e privacidade de informações

A segurança e a privacidade de informações estão relacionadas às questões dos níveis de proteção contra ataques externos ou da não permissibilidade de acesso a informações privilegiadas. Com o aumento de aplicações envolvendo redes conectadas à internet nas quais ocorrem a troca de informações entre sensores, computadores e servidores, esse tema tem sido a principal preocupação de empresas e desenvolvedores.

A aquisição ilegal de materiais confidenciais, dados cadastrais, vídeos obtidos através do IP de câmeras, fotos pessoais de servidores em nuvem e aquisição de senhas são algumas das principais atividades realizadas por hackers. Ao aumentar o número de dispositivos conectados em uma rede, os prédios inteligentes irão, conseqüentemente, aumentar os riscos relacionados à proteção e à segurança destas informações. Para que não seja alvo de invasões, os edifícios inteligentes devem ser capazes de prover os meios necessários para atender requisitos de confidencialidade, integridade, disponibilidade e autenticidade de suas informações. Estudos como o apresentado em [32] defendem que as redes de sensores e atuadores sem fio devem possuir um sistema de proteção das informações em cada um dos nós de sua rede. Também é destacado o uso da criptografia das informações como uma das principais formas de proteção. Novas tecnologias de identidade (IdM) têm possibilitado a criação de serviços complexos compartilhados em múltiplos domínios. A criação de círculos de confiança ou a capacidade de gerar credenciais de identidades com preferências pré-configuradas dificultam o ataque de hackers.

As grandes preocupações de segurança com relação a aplicações IoT, giram em torno de dois aspectos. O primeiro aspecto trata da relação de confiança que deve ser estabelecida entre a rede de objetos e um novo dispositivo a ser adicionado a essa rede. A segunda preocupação envolve aplicações nas quais as informações são transmitidas para processamento em servidores do tipo nuvem. O envio de dados pessoais ou mídias requer o consentimento dos usuários, que devem aceitar os termos legais dos provedores de serviços. Entretanto, a leitura

desses termos e a compreensão dos riscos envolvidos pode ser uma tarefa desagradável para a maioria dos usuários. Além disso, os dados disponíveis podem ter um segundo uso na internet mesmo após o fim da sua utilização. Sendo assim, os usuários desses tipos de serviços correm o risco de perder o controle sobre o uso de suas informações. A revogação do consentimento dos usuários sobre a utilização de seus dados é parte de um conjunto de regras descritas pela OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico).

Garantir a segurança de informação da rede de comunicação oferecida pela inteligência das utilidades de um edifício encerra a lista de pré-requisitos do projeto de um edifício inteligente. A seguir, serão apresentados alguns exemplos de aplicações pontuais com soluções tecnológicas desenvolvidas nos campos de: iluminação, climatização, gerenciamento de energia, segurança e sistemas de emergência, computação em nuvem e retrofit.

2.2.2 Áreas de aplicações

Conforme apresentado na tabela 2, as principais aplicações de IoT voltadas para os edifícios inteligentes incluem: entretenimento, conforto, vigilância, controle de acesso, proteção de crianças, manutenção, ar condicionado, iluminação, irrigação e gerenciamento de consumo. A seguir, há uma série de exemplos de aplicações já implementadas que demonstram como a IoT e as novas tecnologias estão contribuindo para alguns campos de aplicações.

2.2.2.1 Iluminação

A necessidade de garantir bons níveis de iluminação no interior dos edifícios impulsionou o avanço de tecnologias de automação capazes de realizar o controle do acendimento de luzes. Para promover a economia de energia e o uso racional desse recurso, muitas edificações fazem uso da programação, da instalação de sensores de presença, de temporizadores ou dimmers. Os projetos arquitetônicos mais modernos visam cada vez mais a integração entre iluminação natural e artificial. Durante a elaboração do projeto de iluminação, é necessário avaliar os seguintes pontos [33]:

- Técnicas de controle: como é feito o ajuste do fluxo luminoso (radiação emitida por fonte luminosa).
- Ações de controle: como a técnica de controle é implementada.
- Modos de controle: como funcionam as ações de controle.
- Estratégias de controle: o objetivo que o sistema de controle deve alcançar.

Com as novas tecnologias proporcionadas pelo avanço da IoT, os sistemas de iluminação a serem desenvolvidos poderão se beneficiar de certas características, como a comunicação M2M para aumentar a eficiência e reduzir o seu consumo energético. Os novos projetos de

iluminação irão se beneficiar tanto do avanço dessas tecnologias, como a consolidação das lâmpadas LED, quanto do avanço tecnológico nos sistemas de controle. A iluminação inteligente utiliza sensores e tecnologias de informação e computação para aumentar a integração entre iluminação natural e artificial, criando diferentes cenários de iluminação mais dinâmicos, flexíveis, controláveis e interativos. Além disso, novas pesquisas têm sido desenvolvidas para compreender melhor a relação entre o impacto da luz e a qualidade de vida de humanos, animais e vegetação [34]. De acordo com o levantamento realizado por [35], o desenvolvimento desses sistemas compreende a inclusão de inteligência nos seguintes níveis:

- Tecnologia embarcada nos componentes luminosos;
- Luminárias e sistemas de iluminação;
- Gerenciamento e monitoramento das fontes de energia e sistemas de distribuição;
- Soluções completas de iluminação incluindo monitoramento, controle e gerenciamento de aplicações;

Essas modificações possibilitam que os sistemas de iluminação possuam um alto nível de comunicação, sensibilidade ao contexto e diferentes níveis de controle. Por outro lado, uma das dificuldades encontradas pelos desenvolvedores é a falta de padronização nos sistemas utilizados. A utilização de redes de sensores sem fio, como a apresentada em [36] apontam a utilização de uma tecnologia desenvolvida com base no protocolo IEEE 802.15.4. A referência citada comprova que o sistema proposto é simples de ser implementado, expandido e flexibilizado. O autor propõe um sistema de iluminação remotamente controlado, composto por centenas de nós e capaz de incluir dados de medições obtidos por sensores.

Trabalhos como o desenvolvido em [37], combinam um pacote de tecnologias para propor sistemas mais eficientes de iluminação para residências e indústrias. Através do uso de sensores de movimento para detectar a ocupação de salas, fotossensores que controlam a iluminação externa de acordo com a luz solar e sensores de temperatura destinados ao monitoramento do aquecimento das luminárias, o acionamento de ventilação ou o desligamento das luminárias de LED para evitar impactos no conforto térmico. A solução proposta utiliza uma lógica fuzzy utilizada como referência para um controlador proporcional integral derivativo (PID). O controle é feito por um sistema supervisor capaz de armazenar histórico de funcionamento, temperatura limite para acionamento da climatização e variáveis responsáveis pela dimerização das lâmpadas. A tecnologia proposta é capaz de se comunicar com sistemas de gerenciamento de edifícios e pode detectar objetos com falhas. De acordo com o trabalho, o uso dessas tecnologias aplicadas através do sistema proposto é capaz de reduzir em até 50% o consumo de energia elétrica. Todo o sistema é conectado por cabos, técnica semelhante ao DALI (*Digital Addressable Lighting Interface*), sistema que permite o controle dimerizável de luminárias de diferentes fabricantes.

Os sistemas cabeados apresentam diversas limitações, dentre elas a necessidade de um caminho entre os atuadores e os painéis elétricos, que muitas vezes pode ser prejudicado pela infraestrutura local. Os sistemas DALI são os mais conhecidos e utilizados para a automação

de iluminação e foram desenvolvidos para controlar conjuntos de luminárias ou luminárias individuais. Entretanto, as aplicações de IoT para iluminação inteligente permitem a comunicação e o controle de diferentes dispositivos ao mesmo tempo por meio de uma rede de comunicação flexível como o ZigBee ou *bluetooth low energy*. As oportunidades oferecidas pela IoT para os sistemas de iluminação vão desde novas formas de interface, como os smartphones, a novas opções de controle por reconhecimento de gestos através de câmeras e detecção através de paredes [38]. A figura 4 apresenta as principais relações entre as tecnologias que compõe a arquitetura de um sistema de iluminação inteligente.

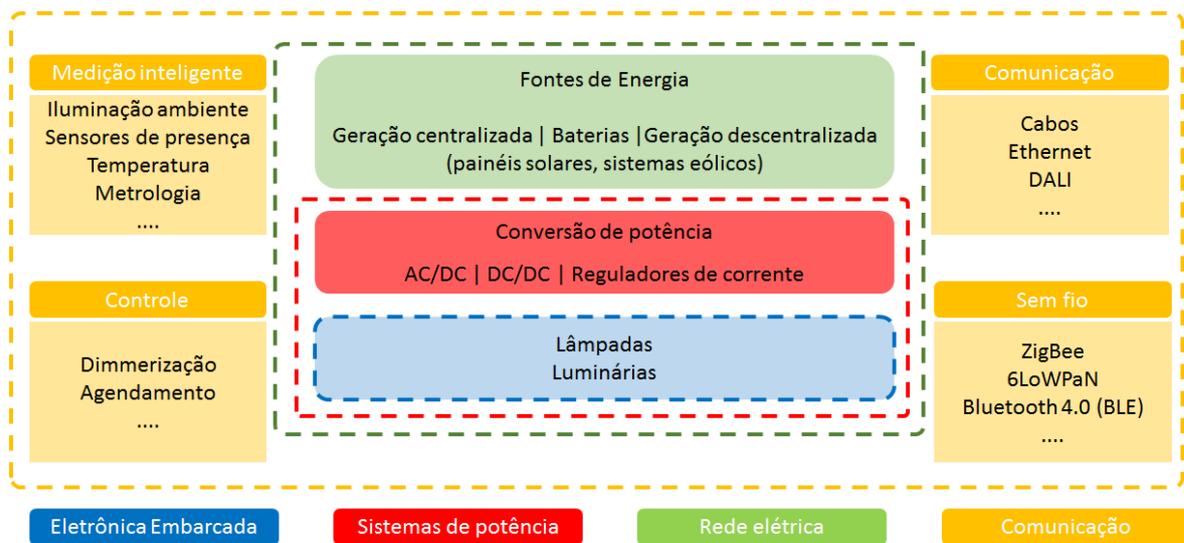


Figura 4. Tecnologias presentes em um sistema de iluminação inteligente e suas respectivas relações. Adaptado de [35].

2.2.2.2 Climatização

Melhorar a eficiência dos sistemas de climatização de um edifício é um passo importante para reduzir o consumo energético e as emissões de CO₂ de um prédio. A avaliação de hábitos de uso aponta que, dentre os principais consumidores de energia elétrica nos edifícios, o ar condicionado é responsável por 48% do consumo de energia elétrica nos edifícios brasileiros [39]. O mercado de climatização tem realizado esforços para aumentar a eficiência energética de equipamentos como trocadores de calor e aparelhos de ar condicionado. Entretanto, a melhoria tecnológica dos equipamentos deve vir acompanhada de avanços no isolamento térmico das envoltórias e de forros de edifícios, bem como no desenvolvimento dos sistemas de distribuição da climatização (dutos, isolamento).

Os sistemas de climatização normalmente utilizados ao redor do mundo são baseados em equipamentos de ar condicionado com chillers. A maioria desses sistemas não operam com o máximo de sua eficiência, sendo que ganhos significativos nesse quesito podem ser alcançados através do aperfeiçoamento dos sistemas e projetos. Por exemplo, a maior

parte dos sistemas de climatização implementados são superdimensionados devido à falta de uma análise crítica e precisa acerca da quantidade de resfriamento necessária para atender à necessidade do prédio.

O mercado de climatização mundial tem passado por um constante aumento de demanda. Tal acontecimento é consequência do crescimento econômico em países de clima quente e do fato de que muitos serviços prediais requerem certo nível de climatização – até mesmo em países frios, para compensar fontes de calor internas (bombas, máquinas, ocupação) em certas épocas do ano. Além disso, algumas técnicas de construção, como o espelhamento de fachadas de edifícios, aumentam a temperatura interna dos prédios, exigindo sistemas complexos de climatização.

Com o objetivo de propor a aplicação de conceitos como WSN, IoT e computação em nuvem, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas no campo dos sistemas de climatização. A introdução desses conceitos permite abordar de forma holística os fatores que influenciam a temperatura interna dos prédios e o impacto no conforto térmico dos usuários. O uso de redes de sensores e atuadores sem fio permite o monitoramento e a análise da temperatura em diferentes áreas. Por exemplo, o monitoramento de temperatura em diferentes salas apresentado em [40] é implementado através de protótipos formados por sistemas embarcados de sensores sem fio construídos com módulos XBee. Esses módulos utilizam o protocolo IEEE 802.15.4/ZigBee para implementar redes do tipo ad-hoc, apresentando baixo consumo energético, autoconfiguração e self-healing. O sistema é composto por um módulo que conecta o sistema à internet, possibilitando a interpretação dos dados através de um computador e a consulta do histórico de temperatura armazenado em uma estrutura de base de dados do tipo MySQL. Apesar de não propor atuação nos comandos de controle ou atuação na climatização do ambiente, a pesquisa valida a possibilidade de um monitoramento abrangente e remoto de variáveis relacionadas ao conforto térmico.

A abordagem teórica feita em [41] mostra que redes WSN possibilitam a redução do consumo energético em sistemas de climatização por zonas. Unir o monitoramento da temperatura com a atuação direta nos sistemas de climatização é uma das formas de obter ganhos em eficiência energética através do controle de temperatura de operação dos aparelhos de ar condicionado, reduzindo o desperdício de energia relacionado à manutenção de baixas temperaturas em áreas do prédio. Atualmente, grande parte do desperdício de energia elétrica em sistemas de climatização é atribuído ao mal-uso dos equipamentos. Escritórios e indústrias vivenciam conflitos relacionados à disputa dos usuários pelo acesso ao controle remoto e ao ajuste da temperatura das salas de trabalho. Além disso, a maioria dos equipamentos depende dos usuários para serem ligados e desligados. Realizar a troca dos sistemas de climatização já existentes em um prédio exige grandes investimentos e esforços para a execução da troca dos dutos, equipamentos ou chillers já instalados. A

utilização de conceitos relacionados a aplicações IoT e redes WSN possibilita uma alternativa de retrofit tecnológico dos sistemas de climatização sem a necessidade de intervir diretamente na infraestrutura local e com baixo custo de implementação.

2.2.2.3 Gerenciamento de energia

A demanda mundial por energia tem crescido de forma contínua nos últimos anos. O setor de edificação é o maior consumidor de energia final em escala mundial, sendo que em 2010, ele foi responsável por 35% do consumo final mundial de energia. Além disso, estima-se que a demanda por energia no setor irá aumentar em 50% até 2050. Os desafios relacionados à demanda de energia são normalmente abordados de duas maneiras: através do aumento da oferta de energia por meio de fontes renováveis ou através do gerenciamento mais eficiente da energia já disponível. A transformação de espaços urbanos em mini geradores de energia elétrica enfrenta alguns desafios, dentre eles a forma ineficiente como o gerenciamento de energia é implementada nas cidades e construções. Conforme apontado por [42] e [43], a IoT possibilita a obtenção de informações proveniente de múltiplos sensores e a comunicação com diversos atuadores. A aquisição dessas informações viabiliza a sensibilidade ao contexto no qual o sistema inteligente é inserido e por meio da computação ubíqua é possível realizar intervenções de forma inteligente e independente do usuário. Espaços inteligentes são ambientes como apartamentos, escritórios, museus, hospitais, escolas, centros de compras, universidades e áreas externas que possuem tais características. Capacitados por meio da cooperação entre objetos (sensores, dispositivos, atuadores e utensílios) e sistemas com a habilidade de se auto-organizar, o gerenciamento de energia em edifícios inteligentes é feito com base em algumas premissas e padrões, sendo capaz de: se comunicar com as utilidades do edifício provendo serviços inteligentes e confortáveis aos usuários finais; monitorar e garantir segurança aos seus usuários; e gerenciar o comportamento energético do edifício de forma a reduzir o consumo.

Com a introdução de novas tecnologias de sensoriamento e monitoramento combinados com sistemas de comunicação modernos, surgem as redes elétricas inteligentes capazes de realizar o gerenciamento energético por meio de técnicas modernas baseadas na otimização de demanda e na disponibilidade de energia na rede. Dessa forma, as redes elétricas inteligentes oferecem uma excelente oportunidade para a implantação de prédios inteligentes com zero consumo de energia, ou seja, construções nas quais a energia consumida ao longo do ano é equivalente à energia produzida no local por meio de diversas fontes capazes de produzir eletricidade instaladas individualmente nos edifícios. Com a curta distância entre os locais de produção e de utilização da energia, as perdas resultantes de transmissão e distribuição são reduzidas, bem como os picos de consumo.

Conforme apontado por [44], as tecnologias de informação e comunicação são essenciais para a sinergia entre os edifícios e a rede elétrica inteligente. Através dos medidores de energia elétrica inteligentes, é possível controlar o fluxo energético bidirecional e conhecer a

demanda energética do usuário. Além disso, [45] aponta uma aplicação na qual os medidores inteligentes serão capazes de realizar a previsão das cargas elétricas do prédio. Os dados coletados pelos medidores inteligentes podem ser utilizados pelos sistemas de gerenciamento energético dos edifícios e, quando combinados com dados de estações meteorológicas, inteligência artificial e algoritmos de aprendizado de máquinas, permitem a dedução das relações entre consumo energético e diversas variáveis, como temperatura, radiação solar, horários e ocupação dos prédios.

Uma vez que a disponibilidade e o preço pago pela energia elétrica na rede variam ao longo do dia, é relevante a capacidade de ajuste da demanda por energia elétrica no prédio para se evitar picos de consumo nos instantes mais caros. A capacidade de resposta à demanda nos edifícios é uma alternativa de baixo custo que pode auxiliar no nivelamento do consumo energético e otimizar o uso nos períodos mais favoráveis. Edifícios inteligentes com eficiência energética requerem a integração de medidores inteligentes, tomadas inteligentes, geração de energia doméstica proveniente de fontes renováveis e sistemas de armazenamento de energia para um gerenciamento energético integrado. Essa integração é fundamental para garantir o controle da demanda, do armazenamento e da geração distribuída.

A digitalização desses sistemas é fundamental para garantir a interoperabilidade entre os recursos energéticos. Com o controle em tempo quase real do consumo de eletricidade, os prédios podem exercer um papel similar ao de pequenas baterias espalhadas pela cidade inteligente, sendo capazes de armazenar energia nos períodos de baixo consumo e auxiliando a cidade durante os picos de consumo. A figura 5 ilustra os principais componentes de uma rede elétrica inteligente, com destaque para o papel dos edifícios. Nota-se a presença de diferentes fontes geradoras de eletricidades, como usinas hidrelétricas, cogeração, geradores fotovoltaicos e térmicas solares, fontes geotérmicas e geração renovável nos edifícios. Todas estas fontes estão interconectadas através dos centros distribuidores e chegam aos consumidores finais, sendo eles as casas inteligentes ou os edifícios residenciais ou não residenciais. Além disso, há a presença de armazenadores de energia que são acionados em casos em que a demanda é menor do que a oferta. A taxa de consumo e geração é aferida através dos medidores inteligentes.

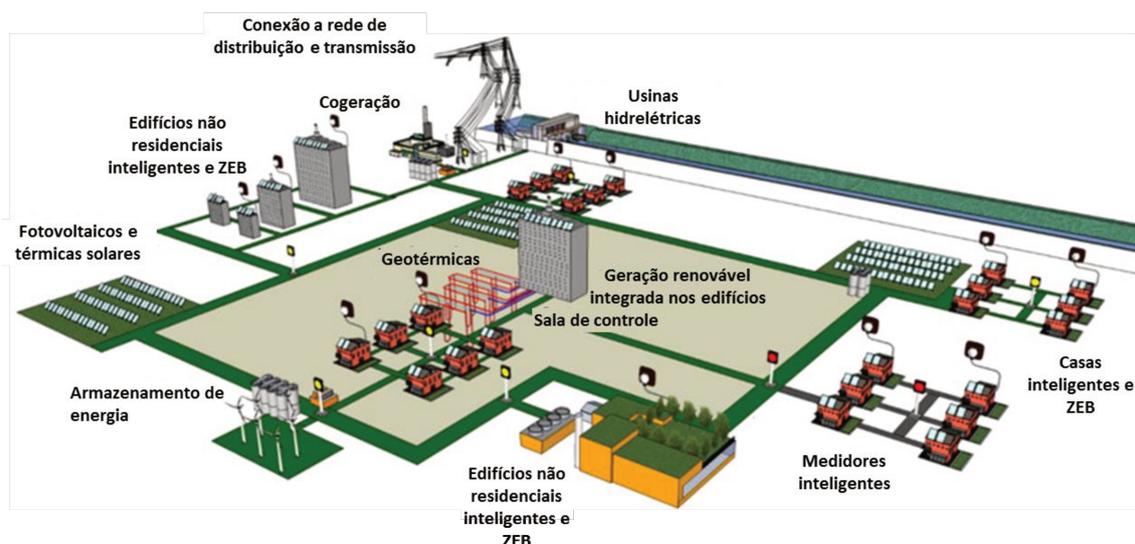


Figura 5. Componentes de uma rede elétrica inteligente. Adaptada de [44].

Soluções de software também podem contribuir para o gerenciamento de energia do edifício. Um software responsável por realizar a supervisão do consumo de energia de um edifício inteligente deve ser capaz de centralizar os dados de aplicações e gerenciar o funcionamento do prédio. Por exemplo, o software recebe os requisitos necessários para a realização de atividades como intensidade luminosa e temperatura de ar condicionado. Os sensores espalhados pelos prédios registram e enviam para a central de controle os dados de temperatura, intensidade luminosa e ocupação dos ambientes. Esses valores são confrontados com os níveis de consumo e geração energética, obtidos periodicamente através dos medidores inteligentes instalados. Alguns edifícios são equipados com baterias utilizadas para o armazenamento de energia; sendo assim, os níveis de cargas dessas baterias também são enviados ao software central.

Com base nesses dados, é efetuado um confronto de informações e necessidades. Obedecendo as prioridades de consumo energético e de conforto nas instalações estabelecidas, são adotadas ações de controle sobre as utilidades de forma a atender esses requisitos. As adaptações necessárias são realizadas pelo sistema de gerenciamento, que deve levar em conta o fato de que o consumo energético do prédio não deve ultrapassar a energia gerada internamente. Entretanto, haverá situações em que isso não será possível, mas o fundamental é adquirir eletricidade da rede durante o menor tempo possível.

Vamos tomar como exemplo um prédio em que, após o acionamento de iluminação e ar condicionado na temperatura desejada de 24°C e com 1000 lux, o consumo passou a ser maior do que a produção de energia ($C > P$). Para retornar às condições energéticas favoráveis, o software propõe alguns ajustes nos requisitos do usuário. Uma das primeiras medidas é a redução do nível de luminosidade requerida em um nível que ainda atenda a iluminação mínima por norma para a realização de determinadas atividades na área. Caso o equilíbrio energético não seja estabelecido após essa adaptação, uma segunda medida é realizada. Dessa vez a temperatura de *set-point* configurada no sistema de climatização é elevada em um grau. Consequentemente, o consumo é reduzido, uma vez que, para cada grau aumentado no termostato, cerca de

3% a 5% de energia é economizada. Tal situação é amplamente discutida na pesquisa apresentada em [46].

Sendo assim, a sinergia existente nos sistemas digitais do edifício inteligente permite que ações sejam realizadas com o objetivo de manter o nível de conforto dos usuários e, ao mesmo tempo, garantir a sustentabilidade das edificações. Os novos modelos de gerenciamento energético são realizados com base nas novas tecnologias de sensores e atuadores, bem como nas novas perspectivas oferecidas por esses componentes, como a previsão de demanda e o ajuste de consumo das utilidades.

2.2.2.4 Segurança e sistemas de emergência

Com o rápido avanço da IoT ao longo dos últimos anos, uma quantidade maior e crescente de dispositivos vem utilizando a internet como meio de comunicação entre si. Nos edifícios inteligentes, esses dispositivos são a interface entre o mundo digital e o mundo físico, sendo responsáveis pelo controle de diversas ações do prédio, como o controle de acesso, a regulação de temperatura e iluminação, o fornecimento de energia e os sistemas de emergência. As expectativas sobre as novas possibilidades oferecidas por esses dispositivos são grandes, bem como os riscos envolvidos ao se utilizar a internet para o controle de dispositivos. A vulnerabilidade dessas redes exige cuidado para evitar que esses dispositivos sejam utilizados como portas de acesso para intrusos ou hackers.

Ao se discutir as aplicações voltadas a sistemas de segurança e emergência nos prédios inteligentes, deve-se também considerar a segurança dos dispositivos responsáveis por implementar esses serviços. Grande parte dos dispositivos conectados à internet utilizam a interface de programa de aplicações (API), ou seja, um conjunto de rotinas e padrões estabelecidos por software que permitem que o programador acesse arquivos, dados ou crie janelas de operação. Caso algum usuário não autorizado tenha acesso aos dispositivos API de um edifício inteligente, ele poderá impactar o cotidiano das pessoas que ocupam esse prédio através, por exemplo, do travamento de portas de acesso, apagar das luzes, alterações nos sistemas de climatização ou outras alterações nas configurações do prédio capazes de alterar o conforto e a atividade dos usuários [47].

Quando comprometidos, as ferramentas dos edifícios inteligentes podem representar ameaças profundas aos arredores físicos nos quais estão instaladas, permitindo que invasores maliciosos causem danos mesmo sem ter acesso presencial ao prédio. Além disso, se estivermos dentro do ambiente empresarial e esses dispositivos compartilharem a mesma conexão de rede que a do sistema de TI utilizado pela empresa, esses dispositivos podem ser utilizados por usuários não identificados como porta de acesso a dados sigilosos. Em recente experimento realizado pela IBM [48], foram testadas as vulnerabilidades de um sistema de automação predial para identificar quais falhas de software permitiriam o acesso de hackers. Identificou-se que

uma das configurações mais utilizadas por sistemas prediais inteligentes é formada por múltiplos dispositivos conectados a respectivas estações e que estas, por sua vez, são conectadas via internet a um servidor de gerenciamento de automação predial. Tal estrutura permite que os técnicos responsáveis acessem esses servidores para obter dados em tempo real de sensores e controlar vários dispositivos a partir de sua estação. Esse acesso é feito por meio de uma rede virtual privada (VPN – *Virtual Private Network*) que pode ou não ser composta por firewalls que controlam as regras de acesso. Uma vez que os técnicos precisam compartilhar o acesso a essas estações, as senhas podem ser facilmente descobertas, já que utilizam alguns padrões internos. Além disso, para evitar custos com viagens múltiplas, contas com o perfil de administrador costumam ser mantidas.

Após análise da arquitetura de rede, os pesquisadores tentaram ganhar acesso ao sistema de controle predial. Sem grandes dificuldades, eles conseguiram ganhar acesso à rede wireless que conectava o sistema à internet e encontrar a senha de acesso para o software de controle de automação predial. Após a descryptografia, os pesquisadores ganharam acesso ao comando central, acedendo ao controle de estações de vários edifícios conectados à mesma rede. Por fim, foi possível utilizar as senhas para obter o acesso ao servidor de comando central e controlar o sistema externamente através de uma rede Wi-Fi.

O estudo de caso aponta que, sem grandes esforços, é possível invadir um sistema de controle predial. Entretanto, também permite identificar algumas ações capazes de evitar esse tipo de invasão. Dentre essas ações, podemos citar a necessidade de utilização de uma engenharia de segurança durante a criação de softwares, bem como o uso de certas práticas de programação; restringir IP capazes de se conectar aos dispositivos do sistema de automação predial; desabilitar administração remota; estabelecer sistemas de segurança de incidentes e gerenciamento de eventos; fortalecer senhas e garantir a atualização de todos os softwares.

Uma vez garantida a segurança e a proteção dos dispositivos do edifício inteligente, as aplicações voltadas à proteção dos usuários não correm o risco de serem utilizadas para outras finalidades. Soluções automáticas capazes de reduzir danos e vítimas em eventos críticos têm sido tema de diversas pesquisas. Contramedidas como o disparo de alarmes, o acionamento de sprinklers e o controle de portas são alternativas que podem ser automatizadas. A expectativa é de que, com a introdução de inúmeros sensores e dispositivos inteligentes em um prédio, os sistemas de emergência possam ser mais rápidos e proativos. A introdução nos edifícios de detectores de fumaça, detectores de agentes tóxicos, câmeras de vigilância, detectores de presença, sistemas embarcados e o uso de dispositivos móveis de última geração trazem maior flexibilidade para as aplicações dos sistemas de segurança possibilitando uma rápida tomada de decisão local com base nos dados coletados e a solicitação de apoio externo quando em casos de extrema periculosidade.

Algumas pesquisas já realizadas incluem a capacidade de análise em tempo real das imagens captadas por câmeras de vigilância. Essa técnica pode ser utilizada para a detecção de incêndios [49] ou para detectar a presença de pessoas em um ambiente durante situações de emergência [50]. Devido ao alto recurso computacional envolvido durante o processamento em

tempo real de imagens, outras soluções têm sido exploradas para a detecção de pessoas, como o uso alternativo dos sensores PIR ou celulares dotados de protocolos Bluetooth.

Neste mesmo sentido, algumas pesquisas apontam os smart phones, tablets e dispositivos eletrônicos flexíveis (relógios, pulseiras, roupas) como fontes de dados ou como meios de se alcançar os usuários. Uma vez que esses dispositivos são dotados cada vez mais de sensores como acelerômetros, microfones e câmeras, existe a possibilidade de utilizar o poder computacional desses aparelhos para obter informações do contexto ao seu redor. Por exemplo, é possível utilizar o acelerômetro de um smartphone para detectar um acidente de carro, agilizando o acionamento do resgate para o local do acidente e diminuindo os riscos para as vítimas [51]. Aplicações semelhantes, como a detecção de quedas de pessoas, poderiam resultar em importantes avanços no monitoramento de idosos e pessoas com necessidades especiais [52]. Além disso, o autor propõe um sistema capaz de utilizar os smartphones para sensoriamento do ambiente, verificação de perigos e interação com os usuários. Entretanto, seria necessária uma maior integração entre o sistema de gerenciamento do edifício e as novas propostas para os sistemas de emergência que ficam impossibilitados de realizar ações customizadas para cada uma das circunstâncias de perigo encontradas.

2.2.2.5 Computação em nuvem

Os sistemas dos edifícios inteligentes são caracterizados pela sua heterogeneidade, complexidade e alto dinamismo. O sistema computacional de um edifício inteligente deve ser capaz de processar a grande quantidade de dados gerados pelos sensores espalhados pelo prédio, providenciar o envio de ações em tempo real para diversos atuadores e gerenciar o funcionamento e o monitoramento de todos esses componentes. Sendo assim, esses edifícios exigem um poder computacional bem superior aos sistemas de automação comumente empregados nos edifícios atuais. Nesse sentido, a computação em nuvem surge como uma nova forma de suprir estes recursos sem a necessidade de construir data centers dedicados para cada edifício.

Conforme o Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia do Departamento de Comércio norte-americano [53] uma das principais características da computação em nuvem é o compartilhamento de sistemas operacionais, aplicações, armazenamento, dados e capacidade de processamento entre usuários. Esse compartilhamento de utilidades é realizado através da internet e permite que os usuários possam acessar os recursos e aplicações instaladas em qualquer lugar e a qualquer instante [54]. A computação em nuvem possibilita a redução de custos ao eliminar a necessidade de empresas em manter *in loco* a infraestrutura de TI e pessoal responsável por realizar a manutenção desses serviços, além de permitir a distribuição dos recursos entre os usuários da melhor forma, com base em suas demandas variáveis. Nesse conceito, os usuários pagam pelo que de fato é usado, sendo que os principais modelos de serviços oferecidos pela computação em nuvem são:

1. *Software as a Service (SaaS)*: o usuário utiliza uma aplicação alocada em nuvem, a infraestrutura é invisível para o cliente, sendo que gerenciamento, espaços em discos, capacidade de rede, sistemas operacionais e servidores fica a cargo do provedor de serviços.
2. *Platform as a Service (PaaS)*: o usuário pode instalar suas aplicações na nuvem bem como realizar gerenciamento e configurações de ambiente. Nesse caso, os aspectos de infraestrutura também permanecem invisíveis.
3. *Infrastructure as a Services (IaaS)*: o usuário contrata recursos computacionais como armazenamento, processamento e redes alocados em nuvem sobre os quais podem ser instalados e executados quaisquer tipos de software. Mesmo sem acesso à infraestrutura, o usuário pode controlar espaços de armazenamento e alocações de aplicações.

A computação em nuvem pode ser utilizada como recurso para aplicações em diversos ambientes, dentre eles os edifícios inteligentes. Dentre os benefícios da utilização da computação em nuvem, encontra-se o gerenciamento de energia do edifício inteligente. O armazenamento e processamento em nuvem permite a rápida análise de dados de consumo de diversos prédios simultaneamente. Algumas pesquisas, como a [55], propõem a implementação de um serviço em nuvem denominado como *Smart Building Diagnostics as a Service (SBDaaS)*, na qual a nuvem seria utilizada para realizar o diagnóstico das utilidades e do consumo energético de um edifício inteligente. Nesse tipo de sistema, os dados podem ser transmitidos e armazenados diretamente na nuvem, ou podem passar por um pré-processamento, o qual permite a geração de pequenos relatórios que são, então, enviados para o armazenamento em nuvem. Além disso, é possível receber através da internet dados de diversos prédios conectados à rede. Os principais dados a serem obtidos estão relacionados aos níveis de ocupação, detectar e reportar falhas na infraestrutura e nos sistemas de energia. Toda essa informação gera uma base de conhecimento sobre o respectivo prédio, a qual deve ser utilizada para o desenvolvimento de estratégias capazes de regular o consumo energético. A figura 6 ilustra algumas das funções disponíveis nesse tipo de arquitetura.

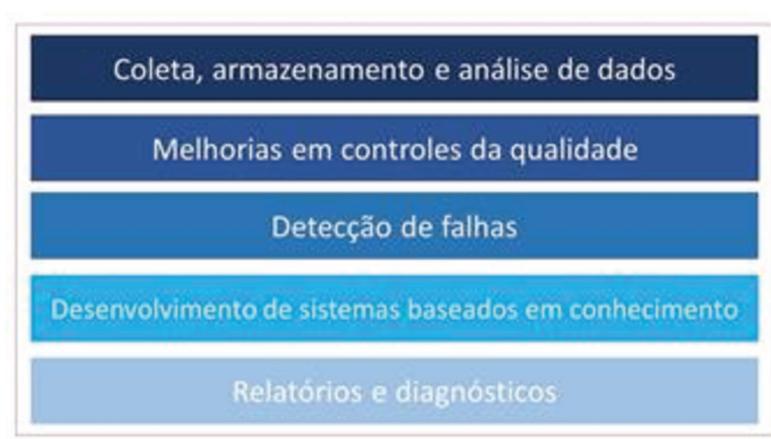


Figura 6. Características de um SBDaaS. Adaptado de [55].

A estrutura oferecida pela computação em nuvem é utilizada para as aplicações IoT em edifícios inteligentes, como demonstra o estudo de caso e a aplicação proposta em [56]. Conforme ilustrado na figura 8, sistemas embarcados compostos por microcontroladores (como o Arduino) são responsáveis por realizar a leitura de sensores ou enviar comandos a certos utensílios. Esses sistemas podem se comunicar via Bluetooth, comunicação serial ou USB a um dispositivo computacional como o Raspberry Pi, que atua como um gateway de comunicação para interligar os dispositivos finais a um sistema de computação em nuvem. O serviço em nuvem, por sua vez, irá realizar a interface com o usuário final através de smartphones ou computadores, cujo acesso é controlado via API. Dessa forma, os usuários podem conferir os estados dos dispositivos ou intervir no controle dos mesmos.

2.2.2.6 Retrofit

A iniciativa europeia FP7 (*EU's Seventh Framework Programme*) patrocina projetos com o objetivo de promover a competição industrial em tecnologias da informação e comunicação [57]. Um desses projetos, o programa E2Rebuild [58], tem como objetivos a investigação e promoção de estratégias de retrofit que possuam alta eficiência energética, boa relação custo-benefício e que agreguem valor a edifícios e apartamentos existentes, endossando os usuários finais a permanecerem e criarem uma sociedade dinâmica. Um dos objetivos do programa é a adequação às diretivas de eficiência energética em edifícios, reduzindo o uso de energia no aquecimento de ambientes em até 75%. Como exemplo de um dos projetos realizados pelo E2Rebuild, os blocos residenciais no subúrbio de Sendling, em Munique (Alemanha), passou por técnicas de retrofit. O edifício, construído em 1954, apresentava uma demanda de energia com aquecimento na ordem de 292,5 kWh/m². Após passar pela instalação de aquecedores solar, aplicação de materiais de revestimento do envoltório com maior isolamento térmico e janelas com altos índices de isolamento, a demanda de energia para aquecimento foi reduzida para 40 kWh/m². A figura 7 apresenta um comparativo da instalação antes e depois de passar pelo retrofit.



Figura 7. Antes (esquerda) do retrofit e edifício após o projeto (direita). Extraído de [59].

Sob a mesma perspectiva da iniciativa europeia, o Buildsmart tem como objetivo destacar técnicas e métodos de construção com alta relação custo-benefício a serem implementados em projetos de construção de novos edifícios em diferentes regiões climáticas da Europa. Os edifícios são construídos com envoltórias capazes de produzir boa isolamento térmica e baixos índices de perdas. As instalações apresentam alta eficiência energética e contam com sistemas de recuperação de calor e produção de energia renovável, além de estarem conectados à rede elétrica local de forma a otimizar o uso de energia e reduzir o pico de demanda. Além disso, os sistemas de gerenciamento de resíduos foram projetados para máxima reciclagem e recuperação energética com novas combinações entre tecnologias existentes e futuras que possuam viabilidade financeira e potencial de replicação.

Dentro da iniciativa europeia Buildsmart [59], o prédio de escritórios construídos pela empresa Skanska (localizado no distrito de Hyllie na cidade de Malmö), é uma construção contemplada com a certificação LEED Platinum. O edifício apresenta baixo consumo energético e utiliza tecnologias de excelente custo-benefício disponíveis no mercado. A instalação possui monitoramento do consumo energético e envoltório com isolamento térmica e baixa perda energética. As instalações que requerem baixo consumo energético minimizam o uso de ar condicionado e de aquecimento (janelas eficientes e equipamentos de sombreamento).



Figura 8. Edifícios de escritórios em Klipporna, Malmö, Suécia. Extraído de [59].

Nos Estados Unidos, a Microsoft [60] possui uma sede localizada na cidade de Redmond, em Washington, com uma área de aproximadamente 1.393.545,6 m², 125 edifícios dentre escritórios e laboratórios e uma população de 59.000 trabalhadores. Os edifícios foram construídos durante diversas décadas e utilizam uma variedade de sistemas de aquecimento, venti-

lação e ar condicionado, o que dificultava uma visão clara da performance energética dos edifícios. A implantação de um projeto, batizado de “*Energy-Smart Buildings*” (ESB), introduziu um software capaz de extrair os dados em tempo real de cada um dos edifícios e avaliá-los, através da estratégia de detecção de falhas e diagnósticos para encontrar oportunidades de economizar eletricidade e dinheiro. A figura 9 ilustra a sede que passou pelo projeto ESB.



Figura 9. Planta da Microsoft localizada na cidade de Redmond. Extraído de [60].

Sensores instalados nos equipamentos de ar condicionado emitem dados a respeito da temperatura, velocidade e posicionamento da ventilação dos sistemas. O sistema de gerenciamento do edifício (BMS) controla os componentes usados para ventilação, ar condicionado e aquecimento. A comunicação é feita através do protocolo MSTP. O software *Energy-Smart Buildings* adiciona uma camada de inteligência, comparando os parâmetros de cada componente com uma lista de dados característica de sistemas com falhas. A organização das informações geradas, junto com o uso de dados extras (temperatura, ocupação) é feita através de gráficos e dashboards. O conceito de Big Data é utilizado para organizar cerca de 7000 defeitos gerados toda semana.

2.2.3 A rotina de um edifício inteligente

Neste capítulo iremos ilustrar a rotina de um edifício inteligente, no qual diversas empresas alocam andares ou salas para seus respectivos escritórios [61]. No edifício há um estacionamento utilizado pelos funcionários com capacidade de recarga para veículos elétricos. No terraço encontram-se instalados painéis fotovoltaicos que compõem um sistema de geração local de energia elétrica. A rotina desse edifício inteligente será quebrada em horários específicos ao longo do dia:

- 08:00 PM: À noite, por volta das 20 horas, ocorre o planejamento inteligente do dia seguinte. De forma automática, o sistema acessa a base de dados da estação meteorológica local e traça o perfil da carga diária com aquecimento/resfriamento. O preço da eletricidade é obtido da distribuidora local. A relação entre a demanda e o preço da eletricidade (considerada variável ao longo do dia) é utilizada para traçar as estratégias de consumo do dia seguinte e determinar as medidas que irão trazer a melhor eficiência energética. A previsão estima altas temperaturas para o dia seguinte, sendo assim, a termoacumulação deverá ser ativada para complementar o sistema de ar condicionado.

A proposição de valor dos serviços de termoacumulação se baseia na substituição do uso do ar condicionado nos instantes em que ocorre o pico de demanda. Durante a noite, quando o custo da energia elétrica é mais barato, o sistema congela a água contida em um tanque para que o gelo seja formado. Durante o dia, o líquido contido nos tubos de refrigeração circula pelo tanque de gelo e, através da ventilação, resfria a temperatura ambiente, evitando que o sistema de ar condicionado seja acionado.

- 04:00 AM: Detecção de falha nos chillers de resfriamento. Durante o resfriamento noturno, o sistema detecta uma falha no chiller de resfriamento. O sistema calcula o custo associado à falha e avalia a gravidade do defeito. Devido ao alto custo, o sistema gera automaticamente uma ordem de reparo dos equipamentos e notifica o gerente do edifício através do smartphone para que o serviço seja autorizado.
- 07:00 AM: Chiller reparado. Os técnicos de manutenção chegam ao local após o despacho da ordem de serviço ser aprovada pelo gerente. O reparo é feito uma vez que a falha já é diagnosticada pelo próprio equipamento, indicando as peças com defeito. O reparo aumenta a eficiência do equipamento e permite que a geração de resfriamento suficiente para atender os picos que irão ocorrer a tarde, detectados pela previsão do tempo.

- 08:00 AM: Chegada dos funcionários e recarga de veículos elétricos. Veículos elétricos e híbridos são recarregados quando o preço instantâneo da eletricidade é baixo ou quando a geração de eletricidade por outras fontes (por exemplo, painéis fotovoltaicos) é alta. A compra de eletricidade do edifício é automaticamente embutida nos custos do sistema e pode ser repassada aos usuários.
- 09:00 AM. Sala de reunião pronta para o uso. Com base num sistema integrado de agendamento de salas, a sala de conferência com capacidade para 15 pessoas já estará pronta para a reunião agendada. Sensores de presença e de CO₂ evitam que a sala continue a ser energizada caso ninguém apareça, ou após o término da reunião. Eles também garantem o conforto caso mais pessoas compareçam à reunião.
- 10:00 AM: CFO exige relatórios de emissão de carbono. Uma agência ambiental pressiona o CFO da empresa para que ele apresente os relatórios de emissão de carbono do seu edifício, assim como as estratégias adotadas para redução de consumo. Com o clique do mouse, os dados são apresentados através de um aplicativo adquirido pela empresa, apresentando uma dashboard com todos os índices de emissão e consumo de energia elétrica.
- 11:00 AM: Preço da eletricidade excede expectativas, causando redução automática da demanda. O preço da eletricidade entre 12:00PM e 2:00PM percebido pelo sistema, excede o limite estabelecido pelo gerente da área. O sistema estabelece medidas para a redução da demanda, como: aumento da temperatura em 1°C, reconfiguração da pressão estática nos dutos de ar comprimido (controle por demanda) e dimerização das luzes em 20%.
- 12:00 PM: O sistema precisa adotar medidas ainda mais severas para a redução de demanda nas áreas comuns: ativar o resfriamento por meio de termoacumulação, reconfiguração da pressão estática nos dutos de ar comprimido (controle por demanda) e dimerização das luzes em áreas comuns em 20%.
- 01:00 PM: O preço da eletricidade previsto entre 2:00PM e 5:00PM exige medidas mais severas na redução de demanda de forma a não comprometer a expectativa de

custo: dimerização das luzes em áreas comum em 40%, aumento da temperatura em 2°C e desligamento de servidores não utilizados.

- 02:00 PM: Ações em TI para a redução de demanda. O sistema alerta os usuários via e-mail ou mensagem instantânea para que desconectem seus computadores da tomada e utilizem a bateria de seus laptops. Uma alternativa seria configurar o gerenciamento de energia dos laptops para que a máquina utilize a bateria durante o período de 2:00PM a 4:00PM.
- 03:00 PM: Nuvem cobre os painéis fotovoltaicos. O responsável pelo edifício possui a restrição de utilizar não mais de 1,5MW no período de 2:00PM a 5:00PM. O edifício conta com a geração solar de painéis instalados no telhado para cobrir essa restrição. Quando nuvens cobrem os painéis solares, o sistema ativa o uso da energia armazenada em baterias instaladas no edifício para cumprir com as obrigações de demanda.
- 5:30 PM: Deixando o escritório. Enquanto os funcionários registram sua saída, o sistema detecta se eles deixaram computadores ligados ou se todas as luzes foram apagadas. A correção é feita automaticamente. Quando o funcionário chega ao estacionamento, o seu veículo já foi carregado ao longo do dia (nos horários mais baratos) com a autonomia para que ele chegue até sua residência.
- 06:30 PM: Final do dia de trabalho. Sistemas de controle de iluminação e de HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*) ativam somente as áreas ocupadas pelo pessoal de limpeza e manutenção de forma a garantir o conforto nas áreas em que estão trabalhando. A vigilância por meio de câmeras é capaz de rastrear as pessoas que continuaram trabalhando. Essa informação é usada para ajustar os *set-points* de iluminação e ventilação.

Como resultado das ações tomadas pelo edifício inteligente, a sua carga de demanda típica é bem inferior à comparada com um edifício típico. A figura 10 apresenta a comparação entre as curvas de demanda para um edifício típico (área em cinza) e a demanda para o edifício

inteligente (curva em azul) citado no exemplo acima. Além disto, é possível observar o comportamento do preço da energia elétrica dado em centavos de dólar por kWh.

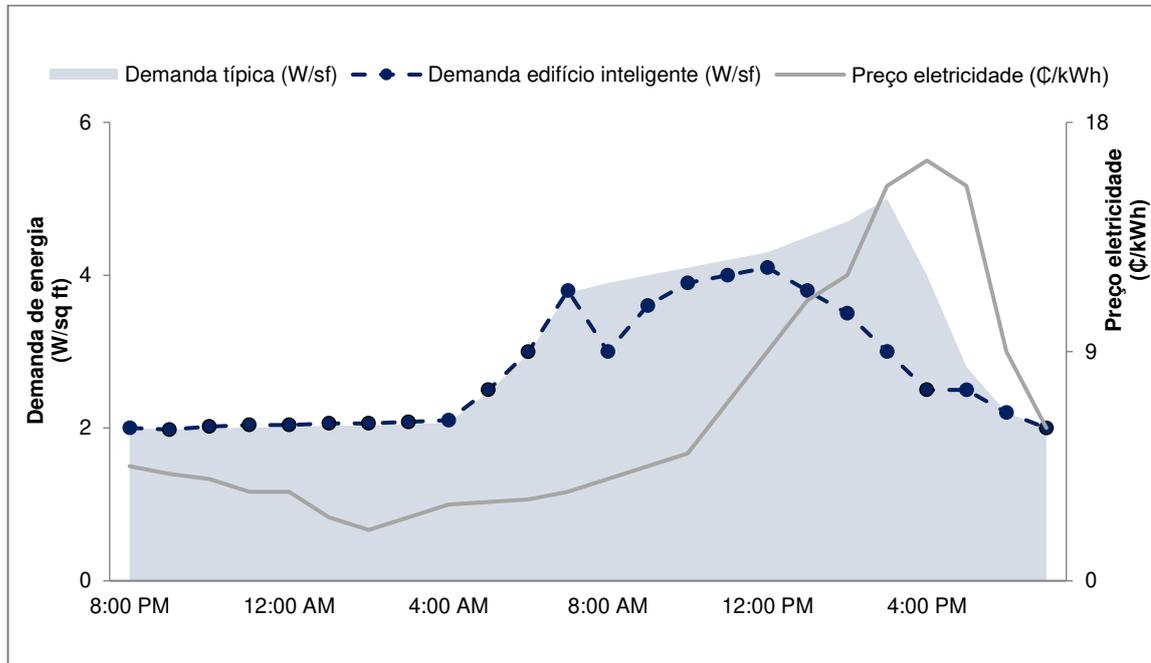


Figura 10. Comparativo da demanda de energia (em W/square feet) entre um edifício típico e um edifício inteligente e o comportamento do preço da energia elétrica (em centavos/quilowatt-hora) ao longo de um dia. Adaptado de [61].

2.2.4 Projetos realizados

A Comissão Europeia tem reconhecido o uso das tecnologias da informação e comunicação como uma das principais ferramentas capazes de melhorar a eficiência energética dos edifícios. O uso dessas tecnologias é visto como o principal meio pelo qual os países europeus irão conseguir alcançar as metas estabelecidas para 2020, dentre elas o aumento em 20% da eficiência energética e a redução de 20% na emissão de gases do efeito estufa em relação a 1990 [62]. A aplicação das TICs nos edifícios europeus deve ser considerada por projetistas, usuários e partes interessadas em desenvolver edifícios mais eficientes do ponto de vista energético. Os principais benefícios reconhecidos no emprego dessas tecnologias são a capacidade de verificar se o edifício e os sistemas nele instalados comportam-se conforme o planejado; ajudam a monitorar se a performance e a eficiência do edifício permanecem constantes ao longo do tempo de vida útil da construção; possibilitam alcançar ganhos maiores em redução energética; gerar feedback sobre o comportamento dos usuários e, por meio desses, implementar tecnologias que mais se enquadram ao padrão de uso desses usuários, aumentando o conforto e qualidade de vida.

A análise apresentada em [63], aponta um resumo dos 105 projetos distribuídos em 88 cidades europeias de 23 países. Localizados em regiões com diferentes características climáticas, edifícios residenciais, não residenciais e públicos passaram por projetos pilotos nos quais foram utilizadas diferentes tecnologias. Os resultados desses projetos pilotos permitem avaliar a potencial economia energética que pode ser alcançada através do uso de soluções TICs. A arquitetura de implementação típica dos projetos-pilotos vai de encontro com os principais tópicos abordados em nosso trabalho. A figura 11 resume o tipo de infraestrutura utilizada nos projetos-pilotos europeus.

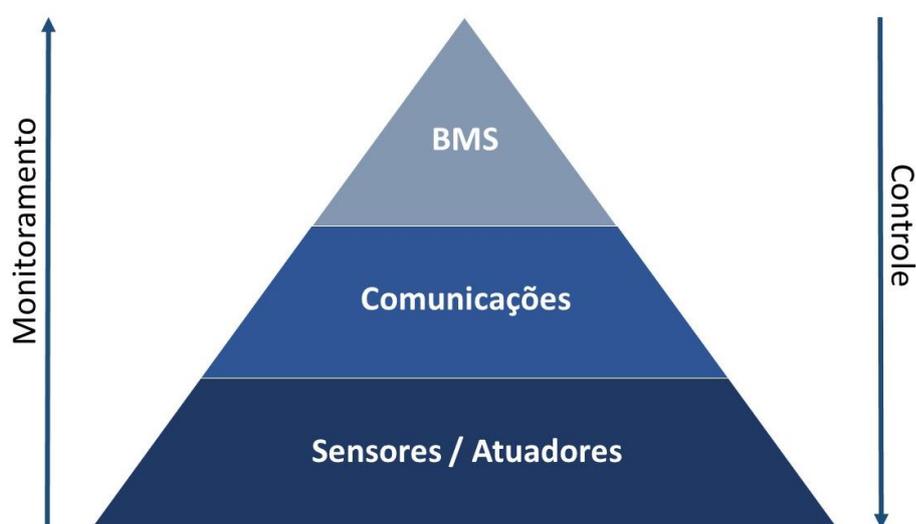


Figura 11. Infraestrutura TIC. Adaptado de [63].

A análise dos projetos-pilotos permite concluir que existem dois tipos principais de topologias. Os sistemas com consciência energética são capazes de entregar aos usuários dados em tempo real de consumo de energia. Ao comparar esses dados com a linha de base de consumo estabelecida, os usuários passam a procurar por ações capazes de reduzir o consumo. O outro tipo de sistema, denominado sistema de gerenciamento energético, entregam informações sobre parâmetros gerais e medidas como temperatura, ocupação, umidade e informações sobre os equipamentos. Esses sistemas são capazes de incorporar o controle sobre dispositivos e manutenção dos serviços do edifício permitindo, por exemplo, o gerenciamento de sistemas de climatização e iluminação em relação a condições exteriores e interiores do edifício.

De uma forma geral, os projetos permitiram a redução de 20% do consumo energético, sendo que, em alguns casos, a redução chegou a até 50% do consumo inicial do prédio. O exemplo da figura 12, mostra o projeto HosPilot implementado na cidade Logronõ. O Hospital San Pedro adotou medidas estratégicas de detecção de presença e monitoramento de estado das salas, otimização da ventilação com base na detecção de presença e no controle de CO₂, tecnologia de iluminação T5 e LEDs downlights, sensores de iluminação diurna e de ocupação para

ajuste de iluminação e ajuste dinâmico do ponto desejado de temperatura com pontos de ajuste de inverno/verão. Todas essas medidas foram capazes de reduzir em 49% o consumo energético [64].



Figura 12. Estudo de caso do projeto HosPilot aplicado no Hospital San Pedro, Logroño, Espanha. Extraído de [64].

As tabelas 3 e 4 apresentadas abaixo apontam os potenciais de redução no consumo de energia anual nas casas sociais europeias e nos edifícios públicos.

Tabela 3. Avaliação do potencial de redução de consumo nas casas sociais europeias.

Casas sociais: potencial anual de economia na Europa

	Redução anual por habitação	Economia anual total
Elétrica	200kWh/habitação	4,471 GWh
Térmico	517 kWh/habitação	11,559GWh
Emissões de CO ₂	92 kg CO ₂ /habitação	2,056,843 ton CO ₂
Econômico	46 €/habitação	1,082 M€

Tabela 4. Avaliação do potencial de redução de consumo nos edifícios públicos europeus.

Edifícios públicos: potencial anual de economia na Europa

	Redução anual por m ²	Economia anual total
--	----------------------------------	----------------------

Elétrica	6,58 kWh/m ²	7,994 GWh
Térmico	5 kWh/m ²	6,075 GWh
Emissões de CO ₂	9,18 kg CO ₂ /m ²	11,152,782 ton CO ₂
Econômico	5,3 €/m ²	6,054 M€

O retorno financeiro das tecnologias implementadas em habitações públicas é obtido a partir dos 5 primeiros anos em alguns casos, mas na maioria dos projetos o retorno gira em torno de 10 anos. De modo geral, é necessário o desenvolvimento de economias de escala durante a produção dos equipamentos tecnológicos utilizados para que ocorra a redução nos custos dessas iniciativas.

A análise do ponto de vista social sobre a implementação desses projetos-pilotos depende de diversos fatores, como o nível de motivação, o conforto percebido, a qualidade de interação social, a comunicação e o suporte dado às tecnologias oferecidas. Entretanto, para garantir o sucesso de um edifício inteligente, é necessário o envolvimento das pessoas que ocupam, moram ou trabalham nele. Cada tipo de edificação exige uma estratégia específica para a divulgação das informações sobre o funcionamento das utilidades e sobre a explicação tecnológica. Por exemplo, o uso de tablets ou smartphones é comum para os jovens e adultos; entretanto, a maioria dos idosos não está acostumada com esse tipo de tecnologia. Em projetos residenciais ou em hospitais, a presença dos planejadores energéticos ou trabalhadores sociais é essencial para a explicação das funcionalidades do sistema aos usuários, orientando sobre os modos de operação e vantagens tecnológicas. Entretanto, em escritórios e prédios públicos, a quantidade de pessoas envolvidas diretamente com as TICs é bem maior, envolvendo funcionários, visitantes, terceirizados e técnicos. Nesse caso, treinamentos periódicos, workshops e o uso dos meios de divulgação e comunicação é a melhor forma para conscientizar a todos.

A auditoria técnica sobre as instalações prediais é fundamental para a compreensão energética do prédio, bem como a identificação dos principais pontos de melhoria. Essa base de análise serve também para a comparação detalhada entre o estado anterior ou inicial e os ganhos obtidos.

De modo geral, a análise dos projetos-pilotos introduzidos na Europa permite identificar alguns passos fundamentais no projeto e na execução de um edifício inteligente:

1. Definir os objetivos
2. Definir condições de fronteira e limitações do projeto
3. Realizar auditoria energética do edifício
4. Selecionar sistema TIC

5. Implementar o sistema
6. Conscientizar e promover o envolvimento dos usuários
7. Analisar e otimizar a performance do prédio
8. Realizar a medição e a verificação da economia obtida
9. Disseminar os resultados.

A identificação dos pontos de melhoria e a definição dos objetivos é o que define as limitações do projeto e permite estimar os investimentos necessários para obras de infraestrutura e aquisição tecnológica. Em paralelo, nos casos onde o retrofit é implementado, a auditoria energética do estado atual do edifício permite a identificação dos principais consumidores de energia elétrica, servindo como guia de projeto e como base comparativa ao se avaliar os ganhos finais. Após a seleção e implementação dos sistemas TICs, deve-se estabelecer uma consciência de sustentabilidade entre os usuários, além de demonstrar o modo correto de utilização da tecnologia instalada, identificando os principais benefícios e ganhos de conforto. A medição e a verificação da economia obtida têm como finalidade promover as boas práticas e dar base para os relatórios de projeto. A disseminação desses resultados inclui uma interpretação clara e transparente sobre o que de fato foi implementado, e como e quais foram os benefícios ao adotar tais metodologias, apontando os principais resultados econômicos e energéticos.

2.3 CONFORTO TÉRMICO E SISTEMAS DE AR CONDICIONADO

No que diz respeito à climatização em edifícios, o ar condicionado é a solução técnica mais empregada atualmente. A necessidade de garantir o bem-estar do indivíduo é um dos fatores relacionados ao conforto térmico. O desempenho humano é impactado pelo desconforto causado por calor ou frio excessivos. Atividades intelectuais, manuais e perceptivas apresentam melhor rendimento quando realizadas dentro de um ambiente confortável termicamente. Por outro lado, como grande parte dos ambientes são condicionados artificialmente, conhecer as condições e parâmetros relacionados ao conforto térmico é uma forma de evitar desperdícios energéticos com aquecimento ou refrigeração em excesso.

O conforto térmico está inserido dentro de um campo subjetivo e depende de fatores físicos, biológicos e psicológicos. As trocas de calor com o meio, as alterações fisiológicas de pessoa para pessoa e as diferenças na percepção e nas respostas a estímulos sensoriais representam, respectivamente, cada um dos fatores mencionados anteriormente. Como definido pela ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers*), o conforto térmico é o estado da mente que expressa satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda. A insatisfação pode ser causada pela sensação de desconforto de frio ou calor, ou seja, quando há diferença entre o calor produzido pelo corpo e o calor perdido para o ambiente. O corpo humano pode ser interpretado como um sistema termodinâmico, em constante troca de calor com o ambiente na busca pelo balanço térmico.

A temperatura corporal é praticamente constante, variando entre 35°C e 37°C. A tabela abaixo apresenta diferentes zonas de respostas fisiológicas para o corpo humano:

Tabela 5. Temperatura corporal e respostas fisiológicas

Temperatura Corporal	Zona de resposta fisiológica
Acima de 43°C	Situação letal
Acima de 39°C	Ocorre perda de eficiência no trabalho
Acima de 37°C	Inicia-se o fenômeno do suor (vasodilatação)
Abaixo de 36°C	Inicia-se reflexo de arrepio (vasoconstrição)
Abaixo de 35°C	Ocorre perda de eficiência no trabalho
Abaixo de 31°C	Situação letal

Para que uma pessoa permaneça em conforto térmico durante a execução de suas atividades é necessário que o calor gerado seja dissipado ao meio ambiente para que não ocorra o acúmulo de calor no organismo. A dissipação de calor para o meio ocorre através da pele e da respiração, sendo que os mecanismos termorreguladores são acionados quando as condições térmicas do meio ultrapassam certas faixas de frio ou calor. O aumento do metabolismo, o arrepio e a vasoconstrição periférica evitam perdas térmicas do corpo e aumentam a produção interna de calor em situações de frio. A redução do metabolismo, a evaporação do suor e a vasodilatação periférica incrementam perdas térmicas do corpo e reduzem a produção interna de calor. As trocas térmicas entre o organismo e o ambiente estão intimamente relacionadas com as características do local e as atividades executadas. Durante o transporte de carga dentro de um edifício, a quantidade de calor liberado pelo organismo é determinada pela atividade realizada, ao passo que as formas como esse calor é dissipado para o meio ambiente ocorre através dos mecanismos de trocas térmicas. A figura 13 ilustra alguns mecanismos de trocas térmicas as quais o ser humano está exposto, como o metabolismo e as trocas secas (condução, convecção, radiação) e úmidas (evaporação – respiração e transpiração).

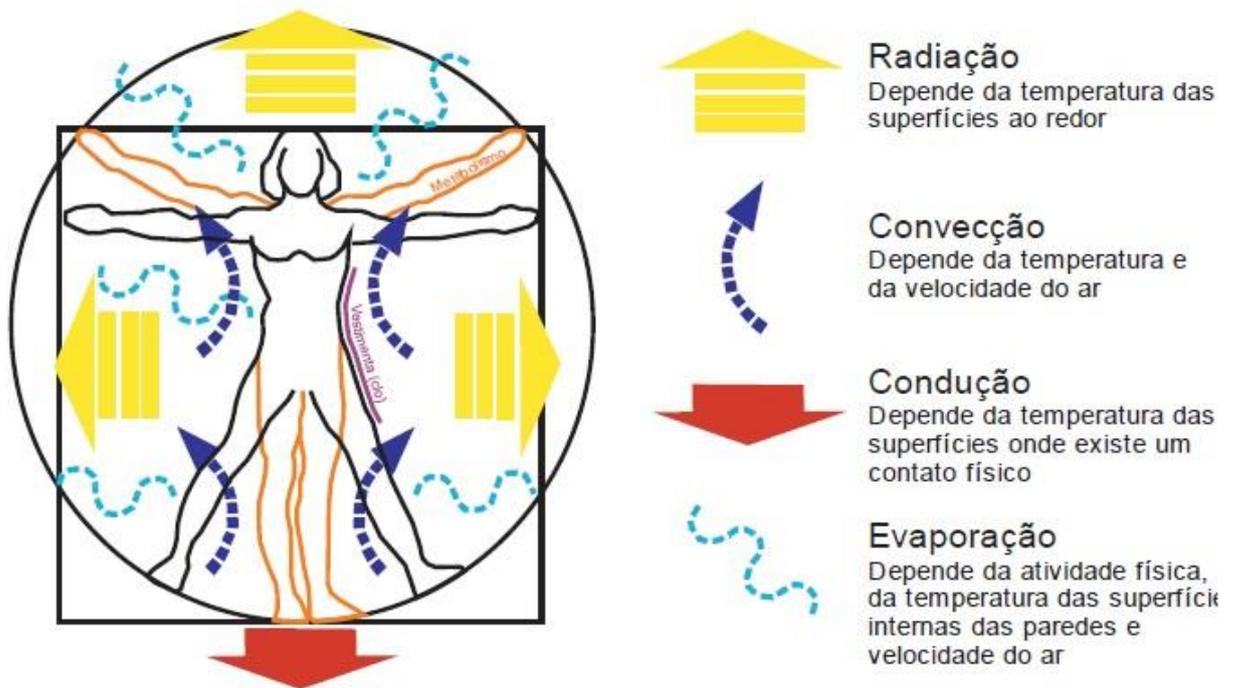


Figura 13. Trocas de calor e o meio ambiente. Imagem extraída de [65].

2.3.1 Variáveis de conforto térmico humanas

As variáveis humanas de conforto térmico são o metabolismo e a resistência térmica oferecida pelas vestimentas. Através do metabolismo é que o organismo produz a energia necessária para a realização de suas atividades. De toda a energia produzida pelo ser humano, apenas 20% é transformada em potencialidade de trabalho; o restante é transformado em calor, que deve ser dissipado para manter o equilíbrio da temperatura interna do organismo. O metabolismo pode ser expresso em W/m^2 de pele ou em Met, unidade de metabolismo cujo valor unitário corresponde a uma pessoa em repouso.

A relação existente é a de $1 \text{ Met} = 58,15 \text{ W/m}^2$ de área de superfície corporal. A tabela abaixo, extraída de [66], apresenta valores de taxas de metabolismo para diferentes atividades. A relação entre atividades e taxas de metabolismo apresentada pela tabela confirma que a quantidade de energia liberada depende do esforço realizado, sendo que quanto maior a atividade física, maior o metabolismo.

Tabela 6. Taxa de metabolismo e respectivas atividades de acordo com [66].

Atividade	Metabolismo (W/m ²)
Deitado, reclinado	46
Sentado, relaxado	58
Atividade sedentária (escritório, escola etc.)	70
Atividade leve em pé (fazer compras, atividades laboratoriais, etc)	93
Atividade média em pé (trabalhos domésticos, balconista, etc)	116
Caminhando em local plano a 2km/h	110
Caminhando em local plano a 3 km/h	140
Caminhando em local plano a 5 km/h	200

Além do metabolismo, a vestimenta representa uma resistência térmica para a troca de calor entre o organismo e o meio ambiente. Conforme o isolamento da vestimenta, é formado junto ao corpo uma camada de ar mais quente ou menos quente, reduzindo também a sensibilidade do corpo às variações térmicas e de velocidade do ar. A resistência térmica da vestimenta depende do tipo do material que a compõe e do ajuste ao corpo. A unidade de medida da resistência térmica das vestimentas é dada em clo, em referência à palavra inglesa *clothes*. A unidade, ou seja, 1 clo, equivale a 0,155m².°C/W e equivale, na prática, a um terno completo. Alguns dos principais valores de resistência térmica (I_{cl}), são apresentados na tabela abaixo, que considera os principais tipos de vestimentas. Para uma pessoa que utiliza mais de um dos itens listados abaixo, a resistência térmica total será dada pela somatória de cada uma das peças utilizadas.

Tabela 7. Vestimentas e índices de resistência térmica correspondentes. Adaptado de [66].

Vestimenta	Índice de resistência térmica – I_{cl} (clo)
Meias	0,02
Meia calça grossa	0,10
Meia calça fina	0,03
Calcinha e sutiã	0,03
Cueca	0,03
Cuecão longo	0,10
Camiseta de baixo	0,09
Camiseta de baixo mangas compridas	0,12
Camisa manga curta	0,15
Camisa fina mangas compridas	0,20
Camisa flanela manga comprida	0,30
Blusa com mangas compridas	0,15
Saia fina	0,15
Saia grossa	0,25
Vestido leve manga curta	0,20
Vestido grosso manga comprida	0,40

Suéter	0,28
Jaqueta	0,35
Bermuda	0,06
Calça fina	0,20
Calça média	0,25
Calça flanela	0,28
Botas	0,10
Sapatos	0,04

Além dessas variáveis, outros fatores de influência – como idade, raça, hábitos alimentares, altura e sexo – também são capazes de influenciar no conforto térmico.

2.3.2 Variáveis de conforto do ambiente

As variáveis ambientais que podem ser medidas e que influenciam no conforto térmico são a temperatura do ar (T_{AR} - °C), a temperatura radiante (TRM - °C), a umidade relativa (UR - %) e a velocidade do ar (V - m/s).

A temperatura do ar também é a principal variável do conforto térmico, sendo também conhecida como temperatura de bulbo seco. De forma simples, quando a temperatura do ar está alta, as perdas de calor do organismo para o ambiente são menores, ao passo que quando a temperatura do ar está baixa, as perdas são maiores. Em um ambiente onde há diferença de temperatura entre dois pontos, ocorre a convecção natural. Nesse fenômeno, a parte mais quente de ar tende a subir enquanto a mais fria desce, proporcionando uma sensação de resfriamento. A medição da temperatura de ar é feita por sensores.

A temperatura radiante média pode ser definida como a temperatura uniforme da superfície de um ambiente imaginário no qual uma pessoa nele inserida realizaria a mesma quantidade de troca de calor radiante do que em um recinto real não uniforme. A medição da temperatura média radiante é dada por instrumentos que permitem a integração em um valor médio da radiação heterogênea das paredes de um ambiente real. Na prática, o termômetro do globo negro é o instrumento mais utilizado.

A evaporação da água do estado líquido para o gasoso forma o vapor presente no ar. A uma determinada pressão e temperatura, há um limite de vapor de água que pode estar presente no ar – quando esse valor é alcançado, considera-se que o ar está saturado. A umidade relativa do ar, portanto, é dada com base na relação entre a quantidade de vapor de água presente no ar úmido e a quantidade de vapor de água presente no ar saturado. A umidade relativa do ar é medida pelo psicrômetro giratório que mede a temperatura de bulbo seco e úmido.

O fenômeno de convecção natural é um tipo de transporte de calor no qual o movimento é dado somente pela diferença de densidade devido a gradientes de temperatura. No caso do ar,

o ar quente, por ser mais leve, tende a subir e o ar frio desce. O deslocamento de massas de ar pode ser forçado por meios mecânicos, como um ventilador. O deslocamento de ar modifica as trocas de calor por convecção e evaporação de uma pessoa. Quanto maior for a umidade relativa do ar e a velocidade do ar em um ambiente, maior será a perda de calor por evaporação e menor será a sensação de calor de uma pessoa. A velocidade do ar é medida por aparelhos como o anemômetro de paletas e o termo-anemômetro.

2.3.3 Sistemas de ar condicionado

Os aparelhos de ar condicionado visam o controle simultâneo, em um ambiente limitado, da pureza, umidade, temperatura e movimentação do ar. Esse tipo de sistema é indispensável em ambientes de trabalho, locais de segurança (manipulação de inflamáveis ou químicos), processos de manufatura que exigem controle de temperatura e similares [67]. Os sistemas normalmente utilizados em edificações são:

- Ar condicionado de janela
- Minicentrais split
- Minicentrais do tipo multisplit
- Self Contained
- Chiller e fan-coil.

Vale ressaltar que, dependendo do sistema escolhido, os sistemas de ar condicionados podem ser utilizados apenas para refrigerar, ou para refrigerar e aquecer. Os sistemas de climatização são classificados em dois tipos: sistema de expansão direta e sistema de expansão indireta. A expansão direta implica no fato de que o ar a ser climatizado entra em contato direto com o evaporador. Na expansão indireta, um fluido intermediário (geralmente água gelada) é utilizado para climatizar o ar ambiente. Baseado nisso, o aparelho de ar condicionado deve ser instalado de forma que tenha contato com duas fontes de calor, uma fria e outra quente, sendo esse contato direto ou indireto. A seguir, faremos uma breve análise sobre cada um dos tipos de aparelhos encontrados no mercado.

O aparelho de ar condicionado de janela é o sistema mais elementar encontrado no mercado. Os aparelhos são compostos por compressor, condensador resfriado a ar, dispositivo de expansão, serpentina de resfriamento e desumidificação, filtros e ventiladores para circulação do ar condicionado e para resfriamento do condensador. O ar externo é puxado através da unidade, onde é resfriado e entregue ao ambiente. A instalação desse tipo de dispositivo é muito simples e consiste em uma abertura na parede voltada para o ambiente externo. Sempre que possível deve ser colocado um ponto de dreno para a água condensada. A exposição direta às trocas térmicas e a radiação solar comprometem em até 30% a eficiência energética desse tipo de aparelho. As versões mais recentes apresentam compressores rotativos, ao invés dos alternativos, o que diminui o peso e o consumo de energia.

Minicentraís split são uma solução mais sofisticada em comparação ao ar condicionado de janela. Nesse tipo de sistema as unidades evaporadoras e condensadoras são separadas, podendo estar distantes entre si em até 30 metros. As duas unidades estão unidas por tubulações de cobre onde correm a substância refrigerante e o dreno. O dreno se faz necessário para realizar o escoamento da água gerada na unidade evaporadora, que ocorre devido à condensação de umidade do ambiente interno. A unidade condensadora é responsável por rejeitar o calor, circulado pelo compressor através das tubulações do sistema. As unidades condensadoras podem ser a gás, água gelada ou fluidos refrigerantes. O ar do ambiente é recolhido pela unidade evaporadora, e chega à unidade condensadora através das tubulações de interligação. Na unidade condensadora, a troca de calor é realizada por meio de serpentinas e a descarga de ar quente (normalmente por volta de 45°C) é feita para o ambiente externo. Em seguida, o ar refrigerado retorna para o ambiente interno através da unidade evaporadora. Um sensor instalado na unidade evaporadora é responsável por comparar a temperatura do ar com a temperatura desejada, desligando o compressor e fazendo com que o equipamento mantenha a temperatura. Ao identificar novas variações na temperatura do ar, o sistema aciona o compressor novamente, responsável pela circulação da substância refrigerante dentro do sistema. As principais vantagens do sistema com relação ao aparelho tipo janela é o baixo nível de ruído e a possibilidade de condicionar espaços interiores sem paredes externas. Entretanto, o seu custo é mais elevado e a instalação um pouco mais complexa, o que requer profissionais especializados.

O sistema multisplit é aplicável em ambientes com vários compartimentos, como escritórios, lojas, galerias, lanchonetes e agências bancárias. Este sistema é capaz de, com apenas uma unidade condensadora e múltiplas evaporadoras, refrigerar vários ambientes simultaneamente. Sua principal desvantagem, entretanto, é que, em caso de defeito na condensadora, as outras unidades evaporadoras são afetadas.

Em ambientes com alta carga térmica, como bancos, edifícios, universidades e restaurantes, um dos sistemas recomendados é o self contained. Esse equipamento é orientado para uma rede com dutos, ainda que também possa ser adaptado com grelhas difusoras em diversos ambientes. O self contained pode ser refrigerado a ar ou água e normalmente são projetados por um profissional especializado. Podem ser classificados como integrados ou remotos. Os self contained do tipo integrados possuem as unidades evaporadoras e condensadoras dentro de uma mesma unidade, ao passo que os remotos possuem tais unidades separadas. Esses sistemas possuem baixo consumo de energia e suas aletas são altamente resistentes às corrosões.



Figura 14. Modelo de sistema self contained. Imagem extraída de < <https://www.carrier.com/residential/en/us/products/ductless-systems/>> acesso em outubro de 2017.

Os sistemas compostos por Chillers e Fan-Coils são alimentados por água fria durante o verão e podem ser alimentados por água quente durante o inverno. Essa comutação pode ser feita manual ou automaticamente, dependendo da instalação realizada. Entretanto, esse tipo de sistema é adequado apenas quando todos os ambientes necessitam de resfriamento ou aquecimento, uma vez que não é permitida a simultaneidade das duas situações. Os chillers são basicamente resfriadores de água cuja potência é medida em toneladas de refrigeração (TR). O Fan-Coil realiza a mesma função que a unidade evaporadora, forçando a passagem de ar pela rede de dutos alimentada com água fria e jogando esse ar para o ambiente interno. Em algumas localidades, a tarifa da energia elétrica é variável ao longo do dia, sendo mais barata em horários que fogem do horário de pico. Sendo assim, alguns fabricantes de chillers desenvolveram equipamentos capazes de acumular água gelada ou gelo durante os horários em que a energia elétrica é mais barata, para posterior uso ao longo do dia.

As unidades evaporadoras estão relacionadas com o tipo de sistema de climatização utilizado, entretanto, apenas as evaporadoras do tipo cassete ou aparentes do tipo piso e teto são equipadas com controle remoto sem fio. A aplicação desenvolvida nesta pesquisa será voltada para esses tipos de evaporadoras.



Figura 15. Evaporadoras do tipo cassete, piso e teto (da esquerda para a direita). Imagens extraídas de < <https://www.carrier.com/residential/en/us/products/ductless-systems/>> acesso em outubro de 2017.

3 DESENVOLVIMENTO E INSTALAÇÃO DO SISTEMA

Para atender ao objetivo desta pesquisa, o desenvolvimento do protótipo foi realizado em etapas. A primeira etapa consiste na elaboração de uma arquitetura a ser utilizada durante a construção do protótipo. Dessa forma é possível obter uma visão macro do projeto e uma prévia dos recursos tecnológicos necessários para a realização de cada uma das funções esperadas.

3.1 ARQUITETURA DE DESENVOLVIMENTO

Utilizando como base as tecnologias utilizadas na implementação de soluções IoT apresentadas no capítulo 2.1.1, foi possível estabelecer uma arquitetura para desenvolvimento do protótipo desta pesquisa. A arquitetura foi elaborada com base nas tecnologias disponíveis no mercado. A divisão em fases visa agrupar os itens utilizados no protótipo por suas finalidades. Dessa forma temos três fases de implementação: a fase de coleta de dados, a fase de transmissão e a fase de gerenciamento e utilização dos dados.

A fase de coleta de dados é subdividida em sensores e atuadores. Os sensores, como o sensor de temperatura e umidade e o sensor de movimento, são responsáveis por prover os dados necessários para a tomada de decisões. O receptor infravermelho é utilizado durante a fase inicial para a aprendizagem dos bits de comunicação entre o controle remoto e o aparelho de ar condicionado. O emissor infravermelho, por sua vez, é caracterizado como atuador, uma vez que transmite a informação desejada para o aparelho.

A fase de transmissão dos dados está relacionada à forma com que os dados circulam pela rede. A troca de informação entre os dispositivos acontece por meio de uma rede do tipo Mesh com comunicação via rádio frequência utilizando o protocolo DigiMesh elaborado com base na IEEE 802.15.4.

A aplicação é voltada para a área de edifícios inteligentes, com plataformas de serviço do tipo *Machine-to-Machine*, construída a partir da plataforma de aplicações open-source Arduino. A figura 16 ilustra a arquitetura utilizada.

A solução proposta é composta por três componentes principais: a central de comando, o módulo atuador e o módulo monitor de temperatura. Todos esses componentes foram construídos com o objetivo de atender aos requisitos iniciais do projeto, ou seja:

1. Retrofit: desenvolvimento de tecnologia que possa ser aplicada a sistemas de climatização já existentes.
2. Baixo impacto: a tecnologia não deve requerer alterações na infraestrutura, exigindo o mínimo possível.
3. Universalidade: ou seja, aplicável a evaporadoras de quaisquer fabricantes.

O capítulo a seguir é dedicado à explicação e ao detalhamento de cada uma das fases de desenvolvimento do projeto.

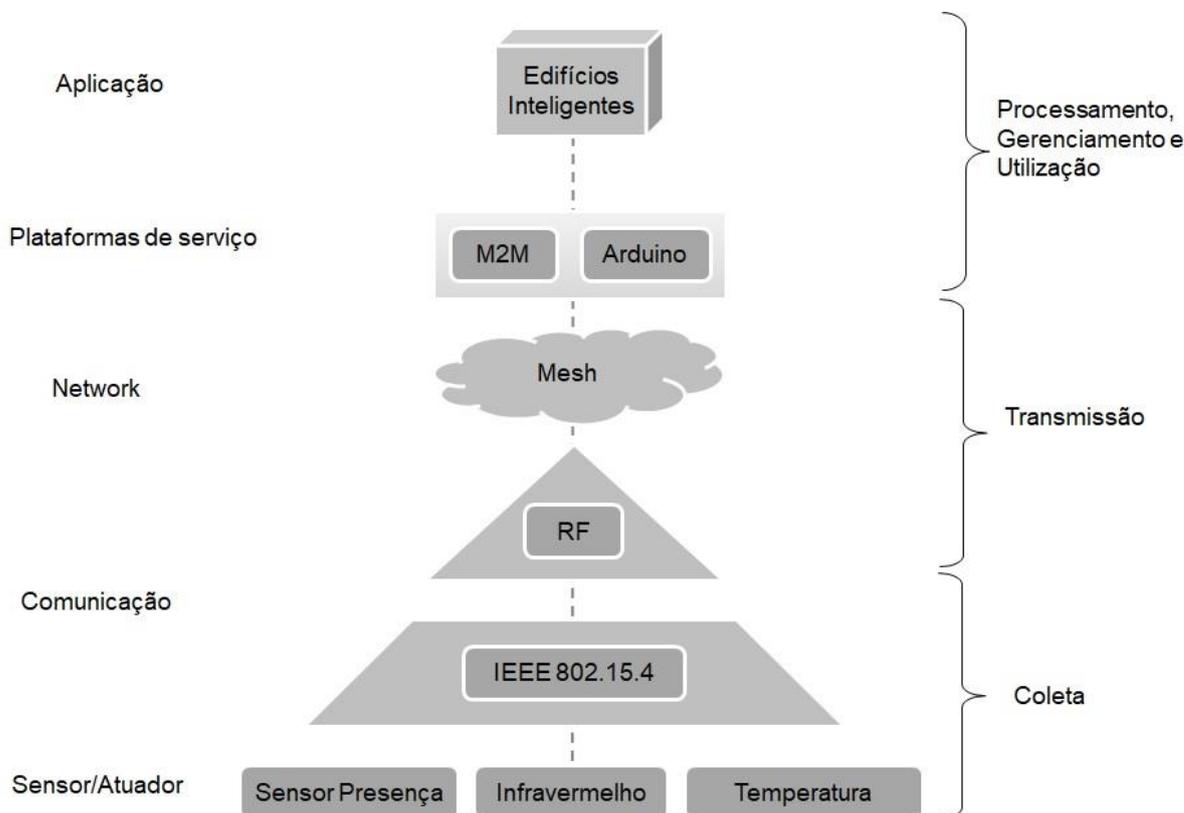


Figura 16. Arquitetura de desenvolvimento. Elaborada pelo autor.

3.2 FASES DE DESENVOLVIMENTO

O sistema é composto por três componentes: a central de comunicação, o módulo de sensoriamento de temperatura externa e os módulos atuadores. A central de comando é responsável por realizar a interface com o usuário e permite a seleção dos horários de operação. A partir da definição dos horários de operação, toda a comunicação e o controle são realizados automaticamente pela programação do sistema. O módulo de sensoriamento de temperatura externa define, a partir de cálculos de conforto térmico, a temperatura de operação dos aparelhos de ar condicionado e envia uma mensagem codificada para a rede, representando a temperatura desejada. A central de comando confronta dados de temperatura com os horários de operação, definindo se os aparelhos de ar condicionado devem operar ou não. Os atuadores são responsáveis por converter os comandos enviados pela rede em sinais infravermelho. Além disso, são responsáveis por comandar periodicamente o acionamento ou não dos aparelhos de ar condicionado dada a leitura do sensor de presença. As fases de desenvolvimento do projeto foram divididas em:

1. Sinal infravermelho: fase dedicada ao aprendizado da comunicação entre o controle remoto e as unidades evaporadoras. Aprender e transmitir sinais infravermelhos enviados pelo controle remoto de qualquer fabricante de ar condicionado.
2. Comunicação entre dispositivos: fase dedicada à configuração de rede Mesh utilizando o hardware XBEE series 1. O objetivo dessa fase é configurar uma rede de forma que todos os dispositivos possam atuar como roteadores para garantir o alcance e facilitar futuras expansões da rede.
3. Central de comunicação: fase dedicada ao desenvolvimento de uma central de comunicação que também possa ser utilizada para realizar a interface com o usuário final.
4. Módulos atuadores: realizar o desenvolvimento de dispositivos modularizáveis e de fácil instalação para enviar comandos aos aparelhos de ar condicionado. Nessa fase, deve ser considerado que os dispositivos construídos respeitem as limitações físicas dos aparelhos de ar condicionado para a instalação dos mesmos.
5. Temperatura externa: fase de desenvolvimento dedicada ao cálculo do índice de calor do ambiente com base nos dados de temperatura e umidade relativa do ar. Esse valor é utilizado para estabelecer a melhor temperatura de operação do aparelho de ar condicionado.
6. Integração e prototipagem: utilizada para garantir o funcionamento do sistema e a proteção dos dispositivos criados.

A figura 17, ilustra os componentes do projeto e a relação entre eles. É possível observar que o usuário é responsável por inserir informações no sistema, como os horários de operação do sistema e realizar a configuração do relógio e calendário do mesmo. A troca de informações entre a central de comando, o monitor de temperatura e o módulo atuador acontecem através de comunicação por rádio frequência utilizando o protocolo DigiMesh. Por outro lado, a comunicação entre o módulo atuador e o aparelho de ar condicionado ocorre apenas pela transmissão do sinal infravermelho com códigos de operação do próprio aparelho salvos na memória do Arduino.

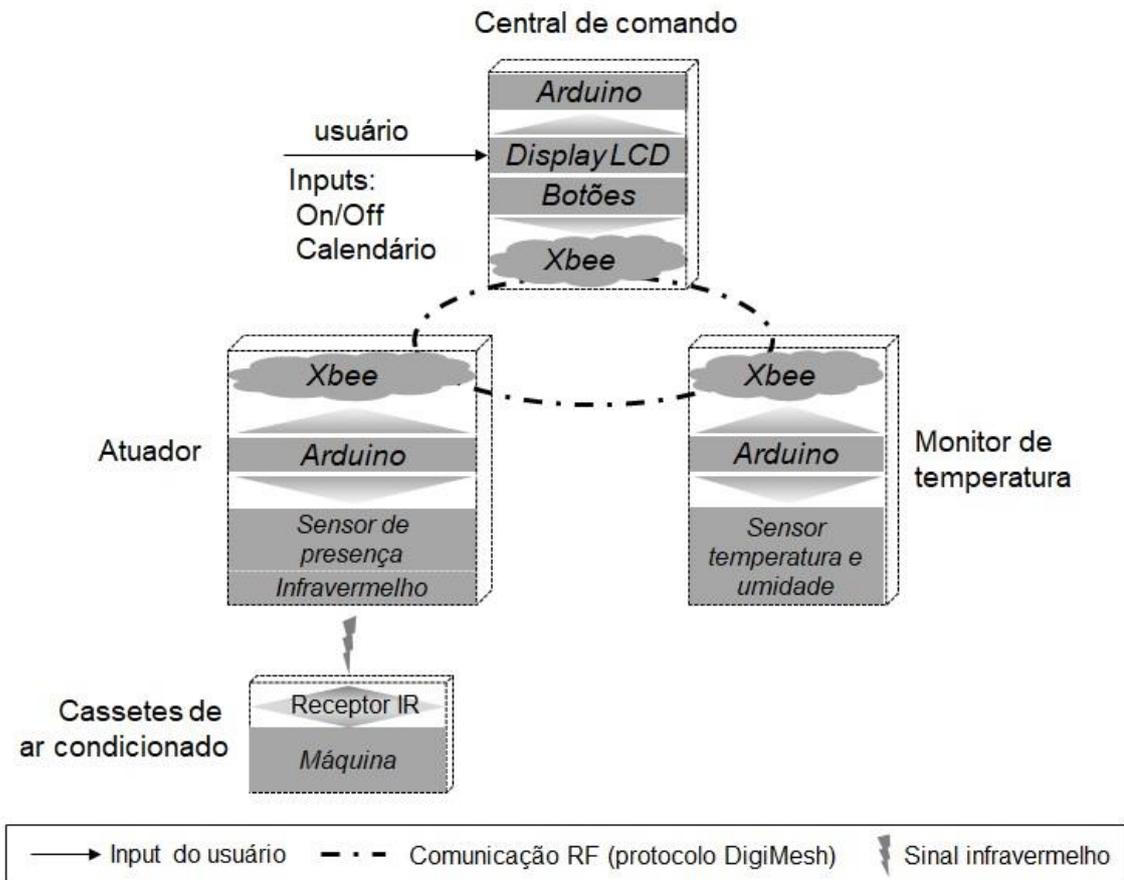


Figura 17. Metodologia da solução proposta, indicando as tecnologias utilizadas para cada um de seus componentes e o tipo de comunicação entre eles. Elaborado pelo autor.

3.2.1 Sinal infravermelho

A comunicação por sinal infravermelho é uma alternativa barata e simples para mediação com tecnologias sem fio. O infravermelho é uma forma de radiação eletromagnética, cuja luz é imperceptível ao olho humano e está presente ao nosso redor, seja através da luz do sol, da iluminação artificial, ou de dispositivos eletrônicos. A faixa de espectro do sinal infravermelho é ilustrada na figura 18.

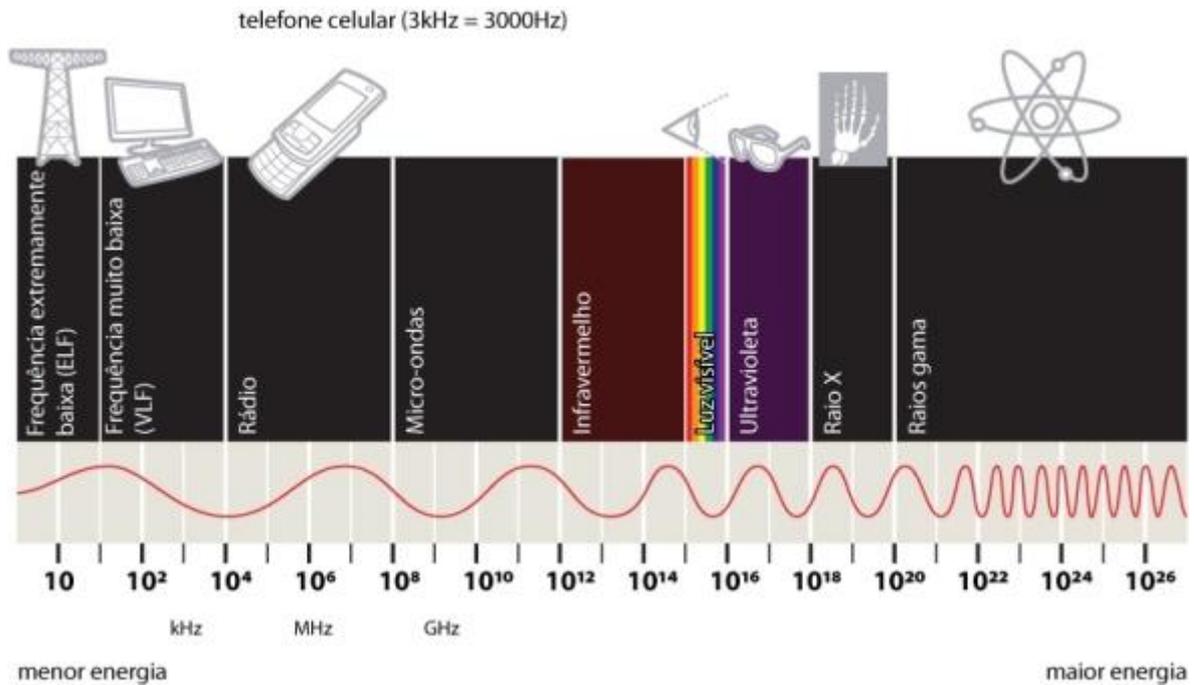


Figura 18. Frequências de ondas. Extraído de < <http://rede.novaescolaclub.org.br/planos-de-aula/controle-remoto>> acesso em outubro de 2017.

Ao utilizar o controle remoto para ligar uma televisão, um LED infravermelho é acionado através do circuito de controle remoto e envia uma onda com frequência de aproximadamente 38 kHz, que contém um sinal modulado através de padrões pré-determinados pelo fabricante. O valor de 38 kHz é utilizado pois poucas fontes naturais de infravermelho são transmitidas nessa frequência, evitando interferências do ambiente na transmissão de dados. Sendo assim, um controle remoto (transmissor) envia pulsos de luz infravermelha, os quais representam códigos binários específicos. A figura abaixo ilustra o código que é enviado através de um controle remoto típico encontrado no mercado.

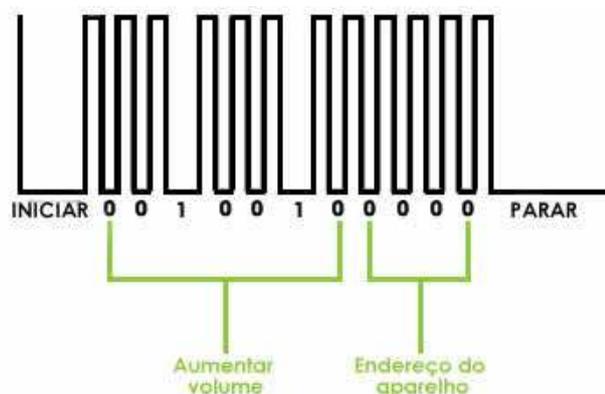


Figura 19. Exemplo de sinal enviado pelo controle remoto. Extraído de < <http://www.crcontroleremoto.com.br/como-funciona-um-controle-remoto.html>> acesso em outubro de 2017.

O receptor de infravermelho localizado na televisão, ou em outro tipo de aparelho, realiza a decodificação desses pulsos em dados binários (0 ou 1) a serem processados pelo microprocessador. Diversos componentes podem ser utilizados como receptores, como o TSOP382 ou o IRM8751 [68]. A figura 20 ilustra a pinagem do receptor de infravermelho IRM8751 utilizado para fabricação do protótipo deste trabalho.

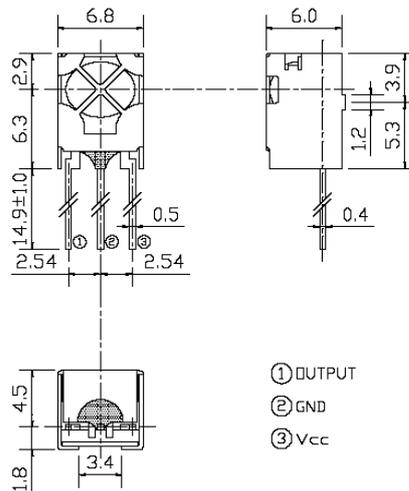


Figura 20. Pinagem do IRM8751. Extraído de [68].

O dispositivo é uma miniatura de um sistema receptor típico de infravermelho, desenvolvido e utilizado por diversos circuitos integrados. O diodo PIN e o pré-amplificador, são montados na camada principal e o conjunto concebido como um filtro IR. A demodulação do sinal pode ser lida por um microcontrolador através do pino output. O sinal pode ser interpretado como uma sequência de bits, representando os diversos comandos. A figura 21, presente no datasheet, ilustra a lógica de funcionamento desse componente e o sinal de saída a ser enviado para processamento.

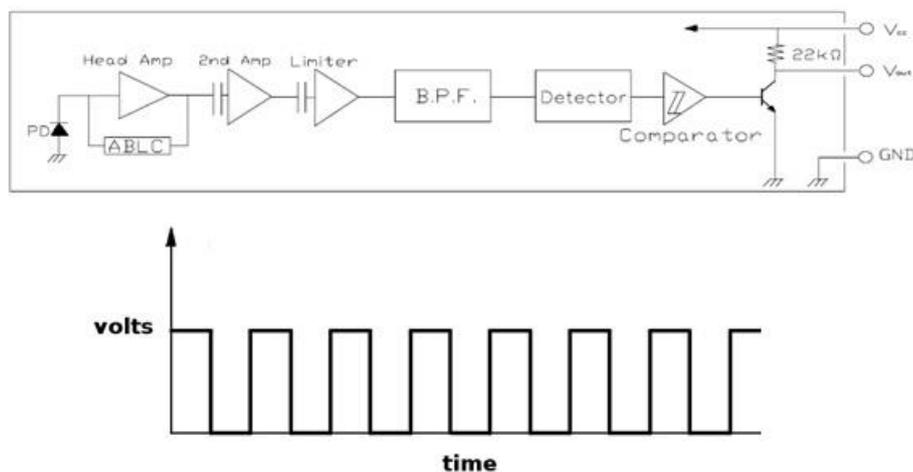


Figura 21. Diagrama de blocos do IRM8751 sinal da porta de saída. Extraído de [68].

O Arduino será o microprocessador a realizar o processamento dos dados de saída do IRM8751. A sua escolha se dá pelo fato de ser um dispositivo open-source utilizado em muitas aplicações voltadas para IoT. Além disso, devido a sua diversidade de bibliotecas e hardwares (conhecidos como módulos) disponíveis no mercado, a prototipagem com esse dispositivo é mais fácil e rápida de ser realizada. Por exemplo, para a leitura de comandos enviados por um controle remoto, iremos utilizar a biblioteca IRremote, disponível na internet [69]. Utilizando o circuito proposto na figura 22, é possível identificar o protocolo de comunicação utilizado pelo controle remoto do cassete de ar condicionado.

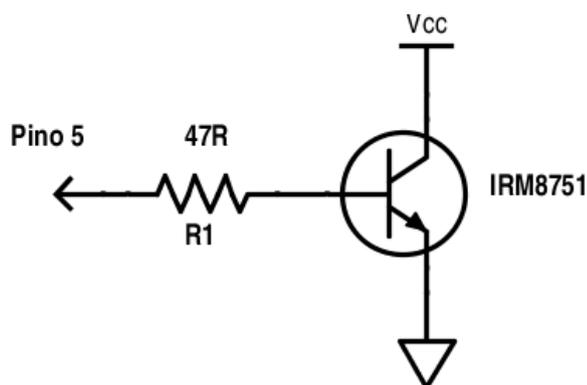


Figura 22. Circuito receptor de sinal infravermelho. Elaborado pelo autor.

Para identificar os comandos enviados pelo controle remoto de um aparelho de ar condicionado, utilizando o circuito proposto na figura 22 em conjunto com a biblioteca IRremote, são necessárias algumas modificações no software. A biblioteca está configurada para receber comandos de aparelhos de televisão, dvd e outros dispositivos similares. Em aparelhos de ar condicionado o envio de dados é abordado de uma maneira mais complexa. Os comandos enviados configuram diversas funcionalidades do aparelho, como velocidade, temperatura, modo, movimentação. Sendo assim, a quantidade de dados enviados é superior à de sistemas mais simples. Para viabilizar a leitura dos códigos de ar condicionado, as seguintes mudanças devem ser realizadas na biblioteca IRremote:

1. IRremote.h: localizar a linha

```
#define RAWBUF 100 // Length of raw duration buffer.
```

Modificar o valor de 100 para 300.

2. IRremoteint.h: alterar a linha 205, que contém a configuração uint8_t rawlen para uint16_t rawlen.

A alteração sugerida na linha 1 evita o truncamento ao receber as mensagens de comando infravermelho em aparelhos de ar condicionado, uma vez que a quantidade de dados transmitida é superior à de equipamentos como televisores ou rádios. Ao alterar o valor de 100 para 300 estamos aumentando o comprimento do buffer de armazenamento dos códigos enviados. A alteração sugerida na etapa 2 é utilizada para aumentar o comprimento da variável inteira e sem sinal “rawlen” de 8 bits para 16 bits.

Utilizando o código presente no anexo A, é possível identificar os comandos enviados pelo controle remoto para configurar o ar condicionado da marca York e modelo RCI/TCCD . O código proposto retorna o intervalo em microssegundos dos pulsos que podem ser observados ao ativar o Serial Monitor do Arduino. A linha abaixo ilustra um exemplo dos resultados obtidos:

```
Raw (276): -18322 4700 -2400 550 -600 600 -600 550 -650 550 -1800 550 -650 550 -650 500
-650 550 -650 550 -650 550 -600 550 -650 550 -650 550 -1800 550 -650 550 -600 550 -650
550 -1800 550 -1800 550 -1850 550 -600 550 -650 550 -650 550 -650 500 -650 550 -650 550
-1800 550 -650 550 -600 600 -600 550 -650 550 -600 550 -650 550 -650 550 -600 550 -650
550 -650 500 -650 550 -650 550 -1800 550 -650 550 -650 550 -600 550 -650 550 -1800 600 -
600 550 -650 550 -600 550 -650 550 -1800 550 -650 550 -600 550 -650 550 -650 550 -600 550
-650 550 -650 550 -650 550 -600 550 -650 550 -1800 550 -1800 600 -600 550 -650 550 -600
550 -650 550 -650 550 -600 550 -1850 550 -600 550 -650 550 -650 550 -600 550 -650 550 -
650 550 -650 550 -600 550 -650 550 -1800 550 -1800 600 -600 550 -600 600 -600 550 -650
550 -650 500 -650 550 -650 550 -650 550 -600 550 -650 550 -650 550 -600 550 -650 550 -650
550 -600 600 -600 550 -650 550 -600 550 -650 550 -600 600 -600 550 -650 550 -600 550 -650
550 -650 550 -1750 600 -1800 550 -650 550 -1800 550 -1800 550 -1850 550 -650 500 -650
550 -1800 600 -600 550 -1800 600 -1750 600 -1800 550 -600 600 -600 550 -1850 550 -600
550 -650 550 -1800 550 -1850 550 -650 500 -1800 600
```

O texto “Raw(276)” não é parte do código, apenas indica o tipo e comprimento do código capturado. O código é iniciado em -18322. Os valores negativos representam as pausas e os valores positivos representam os pulsos. Observando-se os valores, é possível perceber que o primeiro valor se diferencia do restante, indicando que a pausa não faz parte do código a ser enviado [5,6]. Utilizando uma planilha em Excel, foi feita a coleta de 10 amostras para identificar o padrão nos códigos enviados para cada comando. É necessário identificar os valores para intervalos de pulsos e pausas que aparecem com mais frequência a fim de garantir uma maior confiabilidade no sinal enviado e, assim, codificar os comandos desejados. Foram coletadas as sequências que definem as funções:

- Desligar aparelho de ar condicionado;
- Ligar ar condicionado em 18°C, modo fan automático;

- Ligar ar condicionado em 19°C, modo fan automático;
- Ligar ar condicionado em 20°C, modo fan automático;
- Ligar ar condicionado em 21°C, modo fan automático;
- Ligar ar condicionado em 22°C, modo fan automático;
- Ligar ar condicionado em 23°C, modo fan automático;
- Ligar ar condicionado em 24°C, modo fan automático.

Uma vez definida a sequência de valores para cada uma das funções desejadas, é possível utilizar o Arduino, em conjunto com um circuito eletrônico, para enviar os comandos ao aparelho de ar condicionado. Dessa forma, o conjunto irá atuar como o controle remoto original, porém, os comandos serão enviados automaticamente em instantes de interesse do projeto. O circuito emissor proposto na figura 23, utiliza um LED emissor de infravermelho modelo 5308IRC-10, um transistor 2N2222 ou BC547 e uma resistência. O código apresentado no anexo B deste trabalho faz o teste de envio de sinal IR.

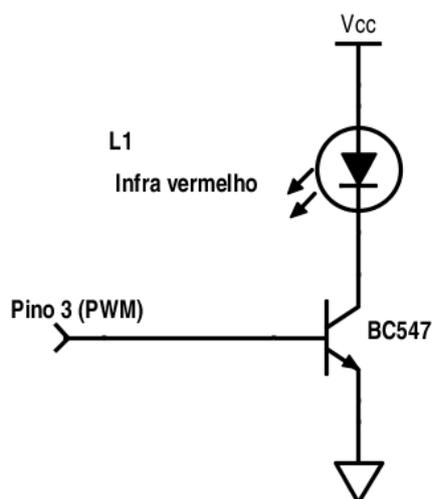


Figura 23. Circuito emissor de IR e pinagem do Arduino. Elaborado pelo autor.

Após compreender o funcionamento dos sinais infravermelhos de um aparelho de ar condicionado, foi realizada uma primeira versão de protótipo. O protótipo inicial teve como objetivo validar o circuito elétrico responsável por enviar os comandos ao aparelho de ar condicionado e validar a dimensão física do dispositivo a ser instalado.

O teste utiliza a seguinte lógica:

1. Utilizar o controle remoto do aparelho de ar condicionado como emissor de sinal infravermelho a ser captado pelo sistema. Esse sinal identifica o desejo do usuário de ligar ou desligar o equipamento.
2. Independentemente da tecla acionada pelo usuário, o sistema irá identificar o sinal infravermelho e realizar duas operações no aparelho de ar condicionado: enviar comando para ligar em 23°C ou desligar o equipamento caso este já esteja ligado.

Os circuitos elétricos presentes na figura 22 e 23 foram complementados com LEDs (vermelhos e verdes) que realizavam a função de sinalizar o status do aparelho. O anexo B, presente neste trabalho, apresenta o código de programação utilizado e a figura 24 mostra algumas fotos dessa primeira etapa de desenvolvimento.



Figura 24. Protótipo inicial do receptor e transmissor de sinais infravermelhos para o aparelho cassete de ar condicionado - elaborado para testes durante a primeira fase de desenvolvimento.

3.2.2 Comunicação entre dispositivos

Para criar a rede de comunicação do projeto, foi necessária a escolha de um hardware que possibilitasse a criação de uma rede DigiMesh. A comunicação entre Arduino será, portanto, realizada através de dispositivos XBee Series 1. Os dispositivos são conectados ao Arduino através da placa XBee Shield, que tem a função de facilitar a interligação entre os pinos

dos dois hardwares. A figura 25 apresenta o XBee Series 1, o XBee Shield e a montagem destes dispositivos com o Arduino.



Figura 25. Dispositivos utilizados para comunicação: XBee Series 1, XBee Shield e montagem com Arduino Uno (da esquerda para a direita). Elaborado pelo autor.

Sem fazer nenhuma configuração adicional no Xbee e utilizando comandos padrões do Arduino, é possível fazer a comunicação entre diferentes placas. No Arduino, o código de programa que é carregado e processado recebe o nome de sketch. Para carregar um sketch em um Arduino com um Xbee shield conectado é necessário mudar os jumpers do módulo para a posição “USB”. O exemplo utilizado é o sketch de exemplo Communication | Physical Pixel disponível na biblioteca do Arduino IDE. Esse código faz com que a placa acenda o LED conectado ao pino 13 quando este receber a letra “H” e desligá-lo quando receber a letra “L”. Após carregar o sketch na placa, é possível conferir sua execução. Ao abrir o Serial Monitor da IDE do Arduino, ao digitar “H” e pressionar “Enter” o LED irá acender; ao repetir o processo com “L”, ele irá apagar.

Após conferir o código, iremos desconectar a placa do computador e alterar a posição dos jumpers para a posição Xbee, conectar a segunda placa com o módulo Xbee no computador, alterar os jumpers dessa placa para a posição “USB” e carregar o seguinte código:

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  Serial.print('H');
  delay(1000);
  Serial.print('L');
  delay(1000);
}
```

}

Após carregar o código na placa, é possível conferir sua execução ao abrir o Serial Monitor na IDE do Arduino. A cada segundo será impresso a letra “H” e “L” alternadamente. Alterar a posição dos jumpers para a posição Xbee. Alimentando as duas placas com uma fonte de alimentação, é possível observar que a comunicação é realizada entre os dois conjuntos, pois o LED do Arduino com o código irá acender e apagar a cada segundo.

Esse rápido exercício permite um primeiro contato com a comunicação entre duas placas Arduino através de um XBee. Entretanto, tal nível de comunicação é muito simples e nenhuma configuração ainda é realizada para que a rede se comunique utilizando o protocolo DigiMesh ou inserindo um mínimo de segurança na rede.

A configuração de fábrica do XBee Series 1 já permite a comunicação entre diferentes módulos. Entretanto, essa configuração de fábrica não é segura pois qualquer módulo externo ao projeto poderia interferir na comunicação. As três configurações mais importantes do XBee são: *PAN ID*, *MY Address* e “*destination address*”. O canal de comunicação do XBee controla a frequência de comunicação dos módulos. A maioria dos componentes opera em 2.4 GHz 802.15.4. Basta conferir que todos os módulos estejam utilizando essa frequência de comunicação.

O PAN ID (*Personal área network ID*) é um valor hexadecimal, configurável, entre 0 e 0xFFFF. O XBee apenas se comunica com outros XBee que possuam a mesma PAN ID. Existem 65536 possibilidades de PAN ID’s, o que dificulta que diferentes redes possuam o mesmo valor.

Cada XBee em uma rede deve possuir um endereço de 16 bits (novamente, entre 0 e 0xFFFF), que é definido como “*MY Address*”. O “*destination address*” determina para qual endereço (*MY Address*) o XBee irá enviar os dados. Para que um XBee envie dados para outro XBee, o *destination address* do emissor deve ser equivalente ao *MY Address* do receptor. No caso de redes DigiMesh, basta configurar todos os dispositivos com a mesma Network ID.

Para configurar os módulos XBee Series 1 é necessário utilizar o software XCTU, disponível no site do fabricante. A atualização de firmware para a configuração da rede no protocolo DigiMesh pode ser realizada seguindo os passos indicados pelo tutorial disponível [70]. O Network ID utilizado em nosso projeto será o BOO1 (Bosch 001). Cada dispositivo a ser adicionado na rede deve ter o seu firmware atualizado e ser configurado com o mesmo Network ID.

3.2.3 Central de comunicação

A central de comunicação será a interface do usuário com o sistema e com os atuadores. Através dela será possível:

- Configurar o horário em que os aparelhos irão ligar/desligar;
- Exibir calendário e horários atuais;
- Visualizar a temperatura do ar condicionado;
- Configurar calendário e horário do sistema.

Os componentes que irão compor a central de comunicação estão listados a seguir:

- 1 x Arduino Uno;
- 1 x Display LCD ARD0052;
- 1 x Fonte de alimentação 9V, DC, 2A;
- 1 x Xbee shield;
- 1 x Módulo Xbee Antenna 1mW;
- 1 x Módulo RTC DS1307;
- 5 x Push-button.

O display utilizado é um display LCD 20x4 modelo ARD0052 [71]. Ele utiliza a comunicação via protocolo I2C com outros dispositivos. A figura abaixo ilustra o componente, bem como um esquema de suas pinagens:

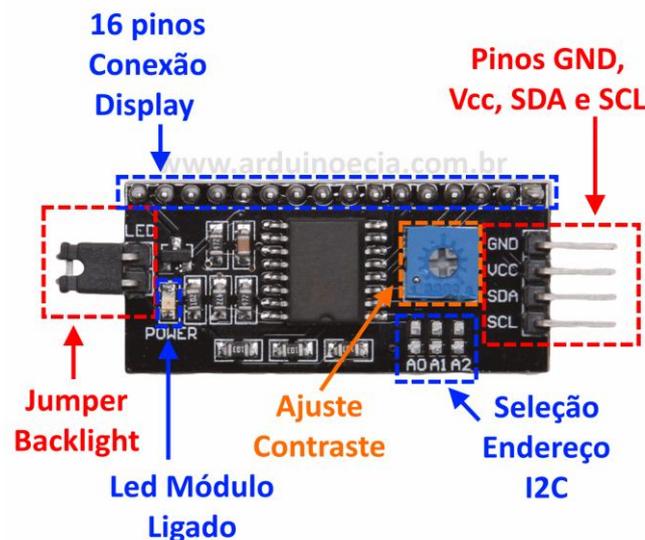


Figura 26. Display LCD com módulo I2C integrado. Extraído de [70].

Durante a montagem da central de comunicação, o pino SDA deve ser conectado ao pino analógico 4 do Arduino e o pino SCL conectado ao pino analógico 5. O pino VCC é o pino de alimentação em 5V e GND, o pino terra. Para controlar o módulo I2C, podemos utilizar a biblioteca LiquidCrystal_I2C. O código abaixo é um exemplo de utilização do display LCD, utilizado para imprimir o menu a ser exibido na central de comunicação.

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

// Inicializa o display no endereço 0x27
```

```

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  lcd.begin(20, 4);
}

void loop()
{
  lcd.setBacklight(HIGH);
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Ligar:");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Desligar:");
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("Temperatura:");
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("Controle remoto:");
}

```

Para criar o menu da nossa central de comunicação, utilizou-se a biblioteca MENWIZ [71]. Nessa biblioteca a estrutura do menu é definida como uma árvore que possui hierarquias. Todos os nós da árvore são iguais, exceto o nó raiz. Cada hierarquia possui somente um nó raiz. Cada nó deve declarar seu nó antecessor, chamado de nó pai ou “*parent node*”. O “*parent node*” da raiz é a própria raiz. A raiz deve ser o primeiro nó a ser declarado. Cada nó a ser declarado é uma propriedade da classe `_menu`. Todos os nós devem possuir pelo menos uma característica, o rótulo (*label*), que é o item a ser exibido no LCD. A seguinte linha de código é utilizada para declarar os nós:

```
addMenu (int qualifier, _menu *parent, _FlashStringHelper* label);
```

Alguns nós são criados com a função de apenas organizar a estrutura do menu. Em outros, queremos que o usuário escolha algum valor ou atributo. Tal tipo de nó é definido como nó terminal. Cada nó terminal possui uma variável, responsável por associar a interação do usuário com o código principal. Isso é feito amarrando um variável padrão do usuário ao nó terminal. Qualquer mudança feita pelo usuário durante sua interação com o menu estará disponível para o restante do código através dessa variável.

Sendo assim, os tipos de nós são:

- Nó raiz: é o primeiro nó a ser declarado. É definido como nó raiz através do atributo `MW_ROOT` durante a criação da estrutura do menu. Só existe um nó raiz na árvore do menu.
- Submenu: um nó que não é o nó raiz e possui um nó filho. É definido com o atributo `MW_SUBMENU` durante a criação da estrutura do menu.

- **Nó terminal:** nó que irá receber as escolhas do usuário. Deve ser declarado através do argumento `MW_VAR`. Deve ser associado a uma variável de menu e amarrado a uma variável definida pelo usuário com o seguinte método:

```
addVar (variable Type, binding variable, ... .);
```

Os tipos de variáveis suportadas, são:

- `MW_LIST`: lista com opções a serem escolhidas (index começa em 0)
- `MW_BOOLEAN`: valor booleano para ser ligado/desligado
- `MW_AUTO_INT`: valor inteiro, com min/máx e passo de incremento/decremento
- `MW_AUTO_FLOAT`: floating, com min/máx e passo de incremento/decremento
- `MW_AUTO_BYTE`: valor byte, com mínimo/máximo e passo de incremento/decremento
- `MW_ACTION`: função a ser chamada quando o usuário apertar o botão de confirmar dentro do nó terminal.

Para incluir qualquer variável no programa, os seguintes métodos devem ser aplicados:

```
void menwiz::addVar (int, int*); // MW_LIST
void menwiz::addVar (int, int*, int, int, int); //MW_AUTO_INT
void menwiz::addVar (int, float*, float, float, float); //MW_AUTO_FLOAT
void menwiz::addVar (int, byte*, byte, byte, byte); //MW_AUTO_BYTE
void menwiz::addVar (int, boolean*); //MW_BOOLEAN
void menwiz::addVar (int, void(*f)()); //MW_ACTION
```

O segundo argumento do método acima é a variável a ser acessada durante o código do sketch. O terceiro, quarto ou quinto argumentos são os valores de “mín”, “máx” e “incremento”. Para declarar os botões de navegação do menu, a biblioteca `MENWIZ` [72] permite a configuração de botões para navegação e ações como “cancelar” ou “confirmar/salvar alterações realizadas”. A estrutura do menu pode ser compreendida a partir da figura 27.

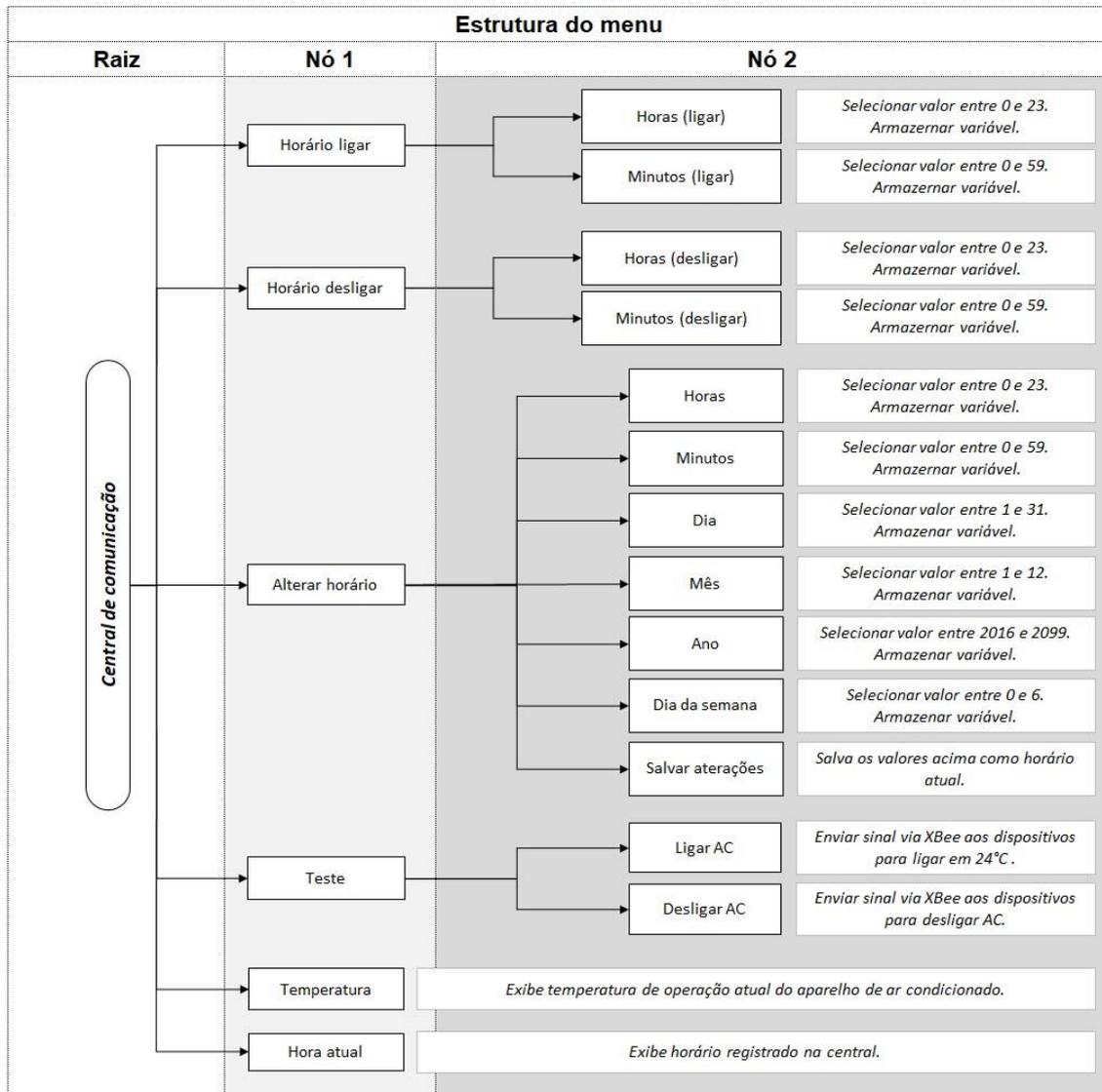


Figura 27. Estrutura do menu da central de comunicação e divisão em nós. Elaborado pelo autor.

As configurações de horário são disponibilizadas pelo hardware do módulo RTC DS1307 [73]. O módulo é um “*Real Time Clock*” (RTC) de baixo consumo, ou seja, um relógio em tempo real com calendário completo e 56 bytes de SRAM. Dados e endereços são transferidos bidireccionalmente através do bus I2C. O módulo disponibiliza informações como segundos, minutos, horas, dia, mês e ano. O final do mês é ajustado automaticamente para meses com menos de 31 dias e anos bissextos. O circuito de detecção de falta de energia presente na placa aciona automaticamente a bateria nele instalada para evitar a perda de dados. O módulo RTC e o seu circuito operacional podem ser conferidos na figura 28.

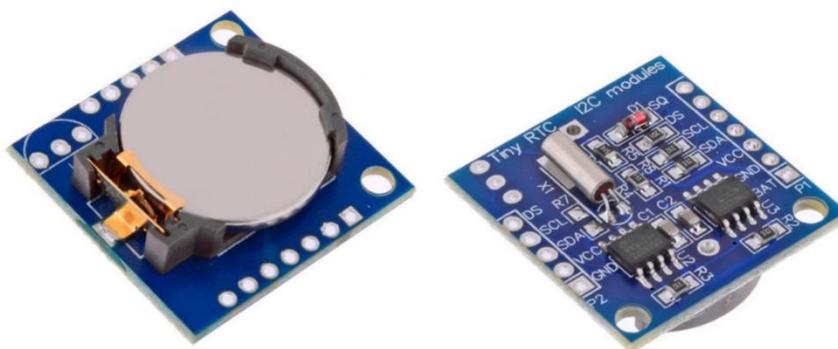


Figura 28. Módulo RTC DS1307. Disponível em <https://www.filipeflop.com/wp-content/uploads/2017/07/58634_16883.png> acesso em outubro de 2017.

O código utilizado na central de comunicação deve, portanto, ser capaz de estruturar o menu para a interação com o usuário, configurar as funções de tempo do sistema e permitir a configuração dos horários de liga e desliga dos aparelhos de ar condicionado. Além disso, a função de teste disponibilizada é utilizada para simular a comunicação entre os dispositivos e os aparelhos de ar condicionado. O envio de comunicações será realizado através de um módulo XBee Series 1 instalado na central de comunicação. O código elaborado para realizar essas informações pode ser encontrado no anexo C deste trabalho.

3.2.4 Módulos Atuadores

Cada atuador é composto por um circuito eletrônico com componentes de comunicação infravermelho, um sensor de presença, um Arduino, um XBee series 1 e um XBee shield. Os módulos atuadores serão instalados nas unidades evaporadoras dos aparelhos de ar condicionado e devem ser alimentados pela rede de energia elétrica. Utilizando esses componentes, o atuador receberá, através da rede WSN, códigos que indicam se o horário atual está dentro ou não do horário de operação definido pelo usuário. O atuador também receberá códigos que representam a temperatura de operação em que o ar condicionado deve ser ligado.

A instalação de um sensor de movimento e de presença acoplado ao módulo atuador evita desperdícios de energia elétrica uma vez que as unidades evaporadoras também são instaladas em salas de reunião, onde a ocupação é esporádica. O sensor de movimento DYP-ME003 [74], permite a identificação de pessoas através do sensor PIR (*Passive Infrared Sensor*). Ele detecta a radiação infravermelha emitida de objetos que estejam localizados dentro do seu campo de visão. Caso as condições de horário e ocupação sejam atendidas, o atuador irá enviar comandos para o acionamento do aparelho de ar condicionado com base nos códigos de temperatura enviados pelo módulo monitor de temperatura. O atuador, entretanto, deve ser capaz de diferenciar as funções de teste das demais funções. O fluxograma abaixo ilustra as principais decisões a serem feitas pelo atuador.

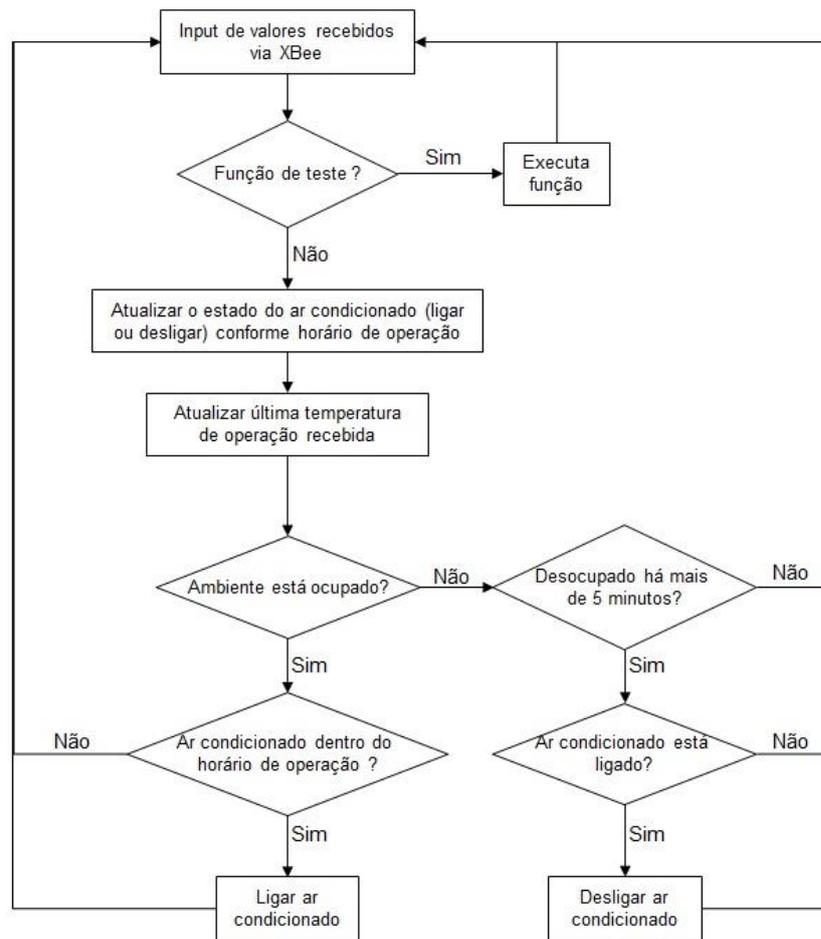


Figura 29. Fluxograma dos módulos atuadores. Elaborado pelo autor.

3.2.5 Monitor de temperatura

O sistema é planejado para que os valores de temperatura externa e umidade relativa do ar sejam utilizados para avaliação de conforto e determinação da temperatura dos aparelhos de ar condicionado. Para isso, foi escolhido o sensor DHT11, alternativa de baixo custo que pode ser utilizada para fazer o registro de dados de temperatura e umidade. O sensor é composto por um termoresistor e um sensor capacitivo de umidade. Além disso, tal sensor é composto por um conversor analógico digital.

Para aplicações com Arduino, é possível utilizar a biblioteca <DHT.h> para coletar os valores de temperatura e umidade relativa do ar. Esses valores são variáveis de conforto térmico do ambiente e a partir deles é realizado o cálculo do índice de calor. Esse índice, estabelecido em 1990 pela Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (NOAA) dos EUA [75], é utilizado para determinar a intensidade do calor sentido por uma pessoa, variando em função da temperatura do ar e umidade relativa. Através da fórmula de cálculo de índice de calor, é possível identificar as situações de calor extremas e que exigem cuidados. O resultado das combinações de valores de temperatura e umidade relativa do ar pode ser visto na imagem 30, que apresenta um gráfico com os valores do índice calculados em °C.

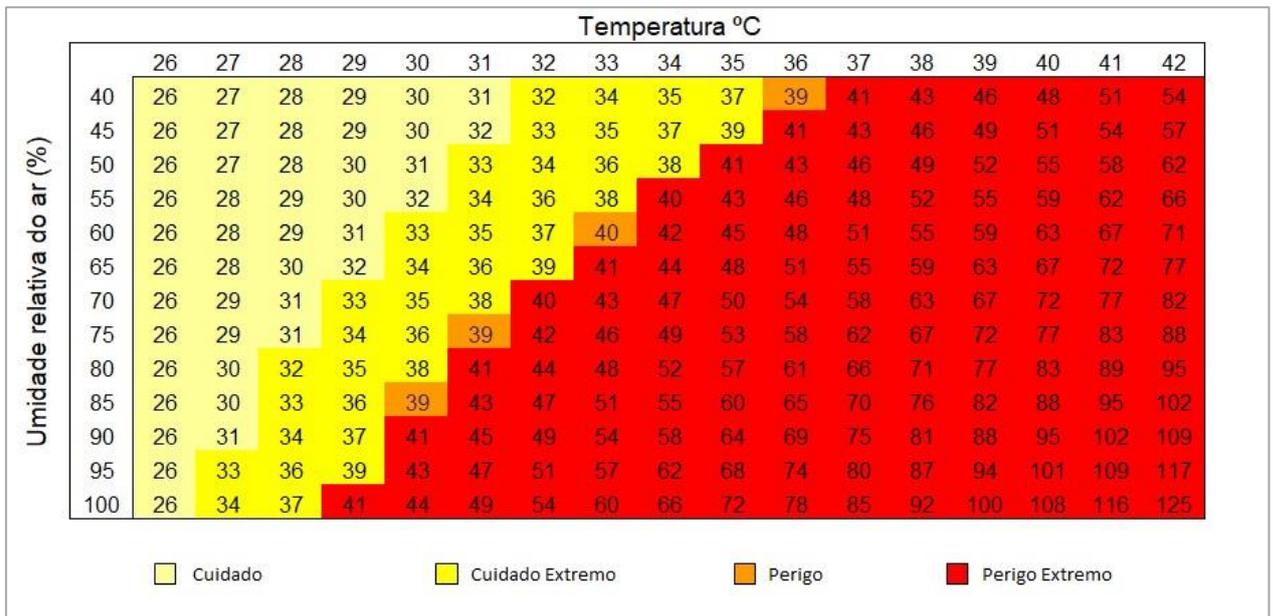


Figura 30. Valores e situações de atenção baseadas no cálculo do índice de calor. Elaborado pelo autor.

Analisando o gráfico da figura 30, é possível concluir que, para a temperatura de 90°F e umidade relativa de 45%, o índice de calor será de 93°F. A partir desses valores foram classificadas faixas de temperatura a serem enquadradas como situações de precaução, extrema precaução, perigo e extremo perigo. Utilizando os valores de temperatura em °C, as faixas seriam:

Tabela 8. Valores de índice de calor e suas classificações.

	Precaução	Extrema Precaução	Perigo	Extremo Perigo
°F	87 - 90	91 - 103	104 - 124	126 e acima
°C	30 - 32	32 - 39	40 - 51	52 e acima

Para associar uma temperatura de operação do ar condicionado para cada índice de calor, foram levantadas situações que representassem os valores de temperatura e umidade da região de São Paulo durante o ano de 2016. Utilizando os valores de temperatura em °C, foi possível estabelecer faixas de índice de calor. A cada uma delas foi atribuído um valor de temperatura de operação do aparelho de ar condicionado, de forma a atender situações de conforto térmico e considerando a queda de eficiência dos aparelhos em situações de extremo calor. O resultado pode ser encontrado na figura 31. Essa relação foi utilizada durante o código dos atuadores, que transmite para os demais dispositivos a codificação que representa cada temperatura de operação do ar condicionado de acordo com os dados obtidos pelo sensor DHT11. Por

exemplo, para a temperatura de 27°C, existem três cenários diferentes. No caso em que a umidade relativa é de até 42%, o índice de calor está na faixa de 25°C até 26°C e a temperatura de operação do ar condicionado deverá ser de 22°C. Para valores de umidade relativa do ar entre 44% e 82%, o índice de calor está entre 27°C até 29°C e o ar condicionado deverá ser configurado para operar em 21°C. Por outro lado, para valores de umidade relativa do ar superiores a 82%, o índice de calor será entre 30°C e 33°C e o aparelho deve ser configurado em 20°C para garantir o conforto térmico dos usuários.

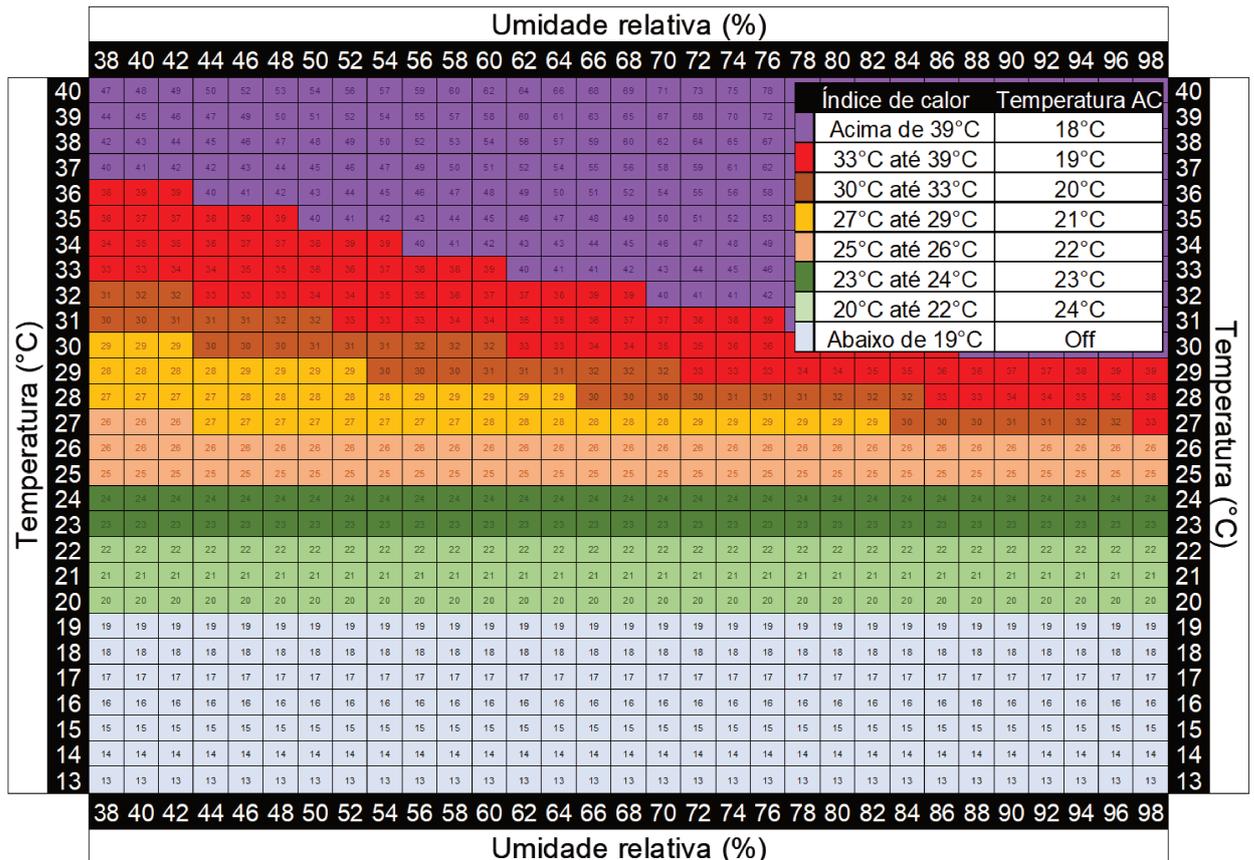


Figura 31. Valores de índice de calor e temperatura de operação do ar condicionado correspondentes. Elaborado pelo autor.

3.2.6 Integração e prototipagem

Após o desenvolvimento dos circuitos e tendo os pré-requisitos bem definidos de funcionalidade de cada um dos componentes do sistema, faz-se necessário a sua integração para realizar o estudo de caso. Em nosso projeto, a rede é configurada na topologia tipo malha, ou mesh, apresentando baixo custo, fácil instalação e sendo bastante tolerante a falhas. A rede é caracterizada por apresentar apenas um tipo de nó/roteador, onde todos os nós se comunicam entre si e podem ser configurados no modo de baixa potência. A rede é configurada para utilizar

o protocolo DigiMesh, sendo utilizado o software XCTU para a sua configuração. A limitação de alcance entre os dispositivos é de 30 metros em ambiente internos.

A prototipagem de cada um dos componentes foi elaborada para prover proteção necessária a impactos leves e manobras de instalação. A central de comando, por exemplo, é o componente que apresenta a maior quantidade de hardware. Uma vez que o seu acesso deve estar disponível aos usuários, foi elaborado um envoltório que permitisse acesso aos botões de controle. A figura 32 apresenta o protótipo elaborado para a central de controle.

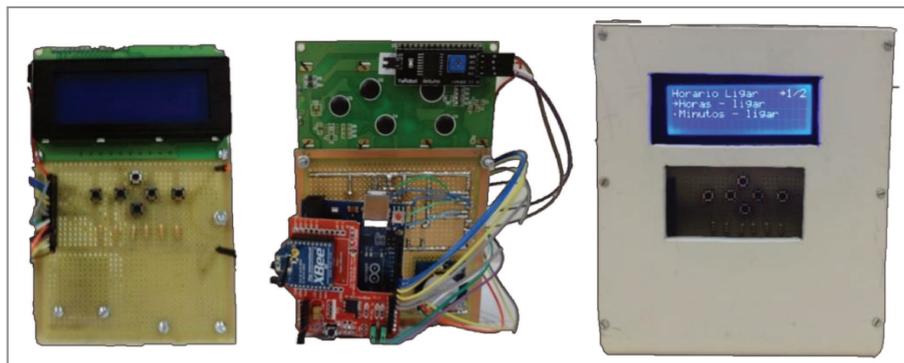


Figura 32. Protótipo elaborado para a central de controle.

Por outro lado, os módulos atuadores são dispositivos que devem ser instalados nas unidades evaporadoras de ar condicionado. É importante que, durante essa instalação, o emissor infravermelho seja alinhado com o receptor infravermelho dos aparelhos. O módulo monitor de temperatura, por sua vez, será instalado em local protegido, mas que tenha contato com a temperatura externa e a umidade relativa do ar. Como pode ser visto na figura 33, tais dispositivos foram elaborados em caixas de acrílico, que permitem fácil fixação tanto aos aparelhos de ar condicionado como em superfícies planas.

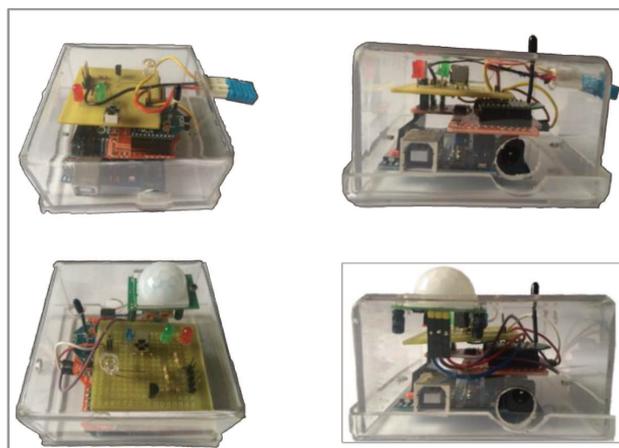


Figura 33. Módulo monitor de temperatura (superior) e módulo atuador com sensor de presença (inferior).

3.3 INSTALAÇÃO DOS DISPOSITIVOS

Após a montagem dos protótipos, a instalação foi feita em dois aparelhos de ar condicionado instalados no escritório do departamento de *Facility Management* – Bosch Campinas. No ambiente foram instalados os três componentes do sistema: a central de comando, o módulo atuador e o módulo monitor de temperatura. Como pode ser observado na figura 34, todos os componentes deverão ser conectados a alguma fonte de energia 110V ou 220V.

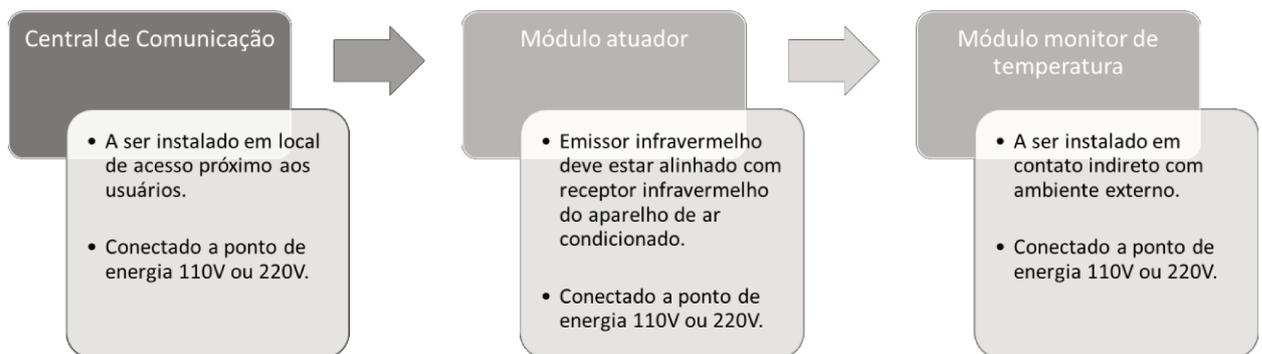


Figura 34. Diagrama de blocos com os componentes instalados no escritório e suas respectivas especificações.

A central de comando foi instalada em um local de fácil acesso para permitir a configuração de horários e análise de operação do sistema de ar condicionado. Para evitar danos físicos aos protótipos, o módulo monitor de temperatura não foi instalado na área externa, e sim sobre o forro do escritório com vista para o exterior, permitindo a leitura de valores de temperatura e umidade relativa do ar mais próximos possíveis com o da área externa. Por fim, o módulo atuador foi instalado em um dos equipamentos de ar condicionado. A disposição dos dispositivos ao longo do escritório pode ser vista na figura 35.

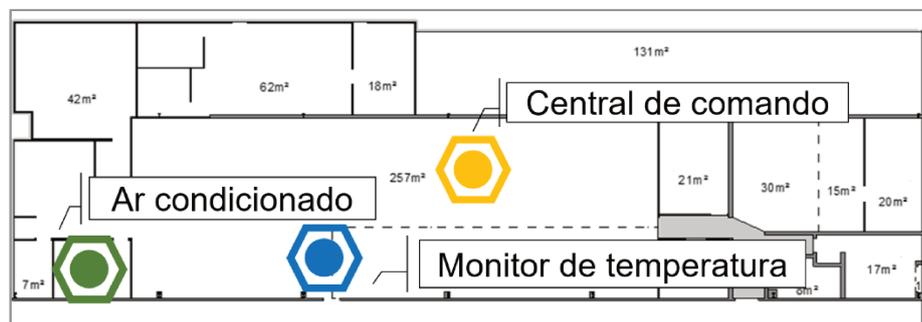


Figura 35. Layout do escritório administrativo e pontos de instalação dos dispositivos.

O escritório escolhido para o estudo de caso utiliza cassetes de ar condicionado embutidos no teto do fabricante York, modelo MKH25G17. No local, os cassetes de ar condicionado estão conectados a chillers centrais de água gelada. O chiller faz a distribuição de água gelada por meio de bombas e nos cassetes de ar condicionado ocorre a troca de calor com o ambiente a ser refrigerado. Após realizar essa troca, a água circula de volta para os chillers centrais.

Para efetuar a instalação dos módulos atuadores é necessário abrir a tampa de ventilação dos cassetes de ar condicionado e localizar o circuito eletrônico responsável por receber os sinais enviados pelo controle remoto. O cassete de ar condicionado contém uma placa eletrônica onde estão instalados o receptor infravermelho e os LEDs indicadores de status. Durante a fixação do atuador no ar condicionado, essa placa deve ser posicionada de forma que o receptor do aparelho permaneça alinhado com o LED emissor infravermelho do atuador. Dessa forma, o aparelho passará a receber somente os comandos enviados pelo atuador, descartando o uso do controle remoto. O processo de instalação é visto na figura 36.



Figura 36. Instalação do módulo atuador no interior do cassete de ar condicionado.

A solução encontrada para melhor instalação dos módulos atuadores foi a sua fixação, com fita adesiva dupla face, na proteção metálica de ventilação. Dessa forma, o circuito eletrônico do aparelho de ar condicionado é reposicionado de forma a impossibilitar que o usuário possa alterar as configurações do sistema através do controle remoto. A única fonte de informações para o cassete de ar condicionado passa a ser os sinais enviados pelo atuador, bloqueando qualquer ação por parte dos usuários, conforme requisitos do projeto. É importante destacar que a instalação é não invasiva e que deve ser feita de modo que os LEDs verde e vermelho permaneçam visíveis pois eles indicarão se o aparelho está ligado ou não. Além disso, no módulo atuador com sensor de presença, foi instalado um LED na cor azul para sinalizar o status do sensor.

4 RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DO PROTÓTIPO

O sistema permaneceu instalado durante 60 dias corridos no escritório de *Facility Management*. Nele trabalham cerca de 30 colaboradores, sendo que o sistema ficou alocado em uma das salas de reunião mais utilizadas pelas pessoas. Durante esse período, foram levantados os dados históricos de temperatura da região de São Paulo, incluindo os valores de temperatura e umidade relativa. Ao longo do período em que permaneceu instalado, o sistema utilizou esses dados para realizar o cálculo do índice de calor e determinar os estados de operação do ar condicionado. Visualmente, os usuários puderam notar poucas alterações no aparelho de ar condicionado, sendo que uma delas foi a posição de indicação de estado do aparelho, como pode ser visto na figura 37.

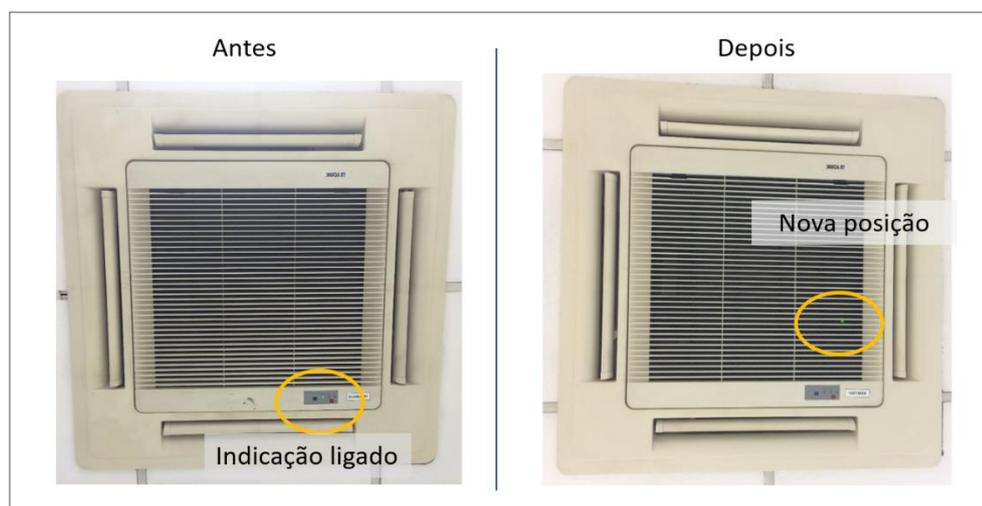


Figura 37. Alteração no indicador de estado de operação do ar condicionado.

É importante ressaltar que, além do controle de temperatura, o controle pelo sensor de presença foi a principal forma de interação com os usuários finais, que puderam notar a sua influência no funcionamento do aparelho de ar condicionado. O sistema foi configurado para considerar vazio os ambientes com ausências superiores a 5 minutos, respeitando, assim, o intervalo mínimo recomendado pelo fabricante de ar condicionado entre o desligar e ligar do equipamento e para evitar a perda de climatização do ambiente.

Com o intuito de compreender a preocupação das pessoas com relação ao desperdício de energia elétrica na empresa e avaliar o grau de satisfação dos usuários com o sistema instalado, foi realizado uma sondagem superficial com os colaboradores do departamento por meio do preenchimento de um formulário com perguntas.

Dentre as perguntas, inclui-se uma avaliação do usuário com relação ao conforto térmico da sala, preocupação com desperdício de energia elétrica e grau de satisfação com o sistema implantado. Ao todo, foram coletadas as respostas de 20 colaboradores que trabalham no local. Os resultados da consulta indicam que a maioria das pessoas está muito preocupada com relação ao desperdício de energia elétrica na empresa. A utilização do sensor de presença satisfaz a maioria dos usuários, que também julgam confortável a temperatura da sala. Além disso, os resultados indicam que os usuários gostariam que o sistema fosse ampliado para as demais salas. De modo geral, as pessoas estão divididas entre muito ou suficientemente satisfeitas com o novo sistema implantado, como pode ser observado na figura abaixo.

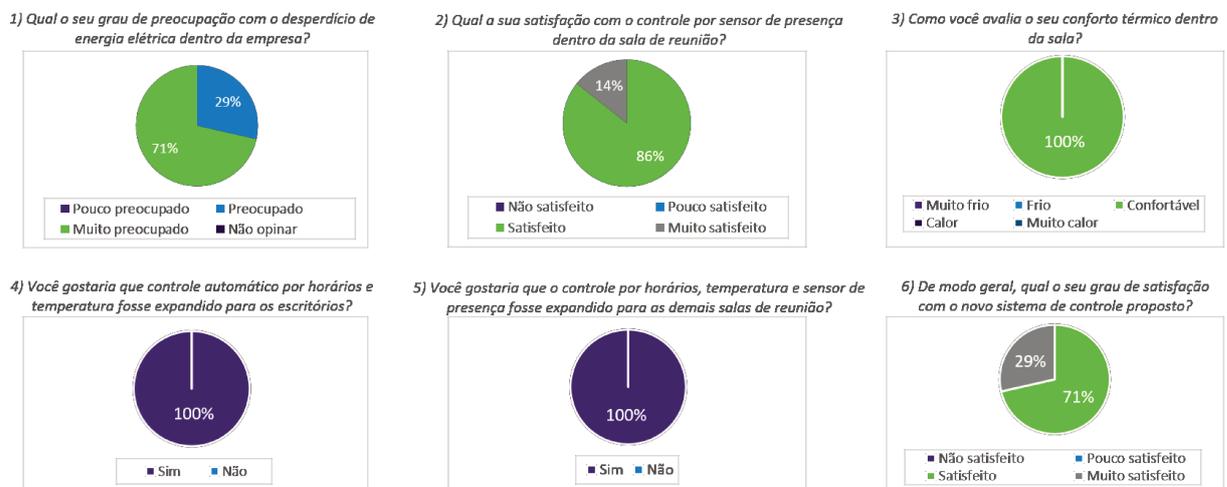


Figura 38. Pesquisa realizada com os colaboradores de Facility Management da empresa Robert Bosch Ltda.

A estimativa do potencial de redução é feita com a premissa de que se o sistema automático de controle por temperatura não fosse implementado, os usuários alterariam a temperatura do ar condicionado para se adaptar à temperatura máxima do dia, prática identificada no local de teste. Por exemplo, utilizando a relação entre índice de temperatura e *set-point* de operação do aparelho de ar condicionado, demonstrada na figura 31, caso a temperatura máxima diária fosse de 30°C e a umidade relativa estivesse em 58%, os usuários tenderiam a abaixar a temperatura dos aparelhos para 20°C de *set-point*. Essa prática é comum nos escritórios pois os usuários acreditam que, quanto menor a temperatura de operação do aparelho de ar condicionado, melhor será a climatização e o conforto térmico. No entanto, o sistema proposto trabalharia com uma modulação de temperatura ao longo do dia, ou seja, o seu ajuste seria controlado conforme a variação de temperatura e umidade relativa externa. Para efeito de cálculo, foram utilizados os dados de temperatura máxima, temperatura média e umidade relativa média na região de São Paulo no período de 01/01/2016 até 10/07/2016, disponíveis no anexo D deste trabalho. De acordo com o estudo apresentado em [76], o consumo de energia elétrica pode ser reduzido de 3% a 5% para cada grau a mais no termostato dos aparelhos de climatização. Sendo assim, comparando os valores de um sistema que trabalha para atender à temperatura máxima diária com um sistema que trabalha para atender à temperatura média diária é possível calcular ganhos em consumo energético por faixas de temperatura.

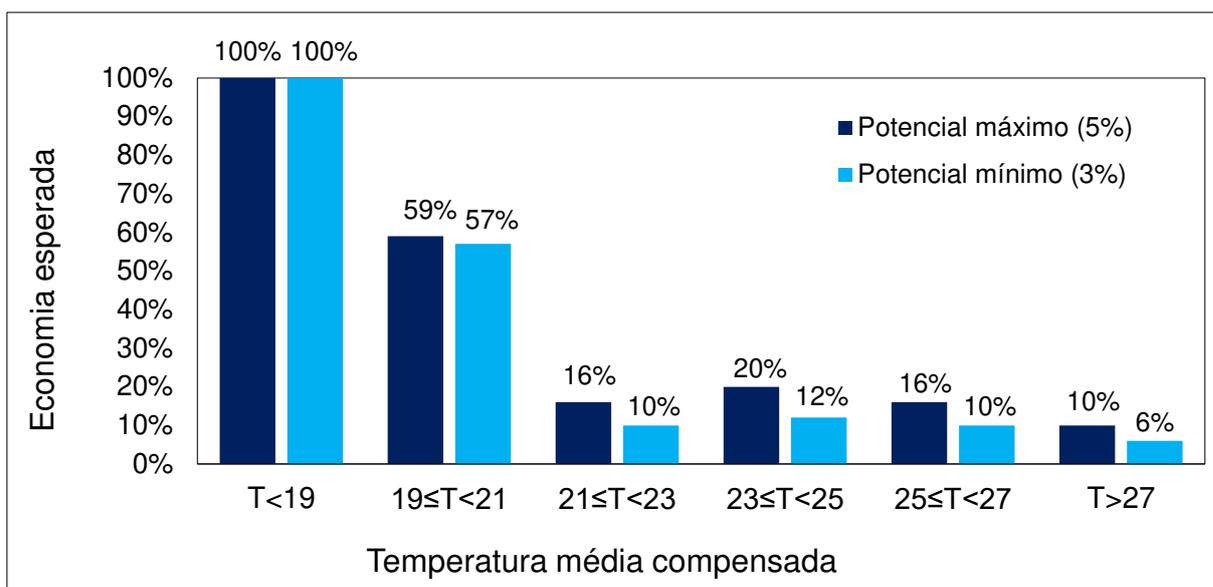


Figura 39. Economia esperada por faixa de temperatura em comparação a um sistema que trabalha para atender temperatura máxima diária.

A partir da análise da figura 39, pode-se observar que, como o sistema desliga os equipamentos de ar condicionado para temperaturas inferiores a 19°C, os ganhos em comparação a sistemas convencionais, que permanecessem ligados nessa faixa de temperatura são de 100%. A faixa de temperatura onde são esperados os maiores ganhos em eficiência energética é para valores entre 19°C e 21°C. Para valores de temperatura superiores a 21°C, o sistema pode apresentar ganhos de até 20% e ganhos mínimos de 6%. Realizando o cálculo da média de ganho para temperaturas maiores que 19°C e menores que 27°C, a técnica apresenta uma redução média de 22%. Entretanto, vale destacar que esses valores são subestimados, pois não estão considerados os ganhos relacionados à detecção de presença.

4.1.1 Comparativo dos resultados

Em alguns dos prédios da empresa Robert Bosch Ltda localizada em Campinas, está instalado um sistema de gerenciamento do consumo de energia elétrica que permite o monitoramento em tempo real. Através dos relatórios de consumo de energia elétrica disponibilizados por esse sistema é possível verificar a evolução do consumo ao longo do tempo e identificar ações que possam ser adotadas para minimizar os custos com eletricidade. Ao longo de toda a empresa existem cerca de 11 prédios cujo sistema de climatização é baseado em centrais de água gelada. Os prédios apresentam características diferentes e demandas de consumo variáveis de acordo com os dias da semana. Alguns desses prédios são administrativos e apresentam rotinas de trabalho e atividades exercidas similares.

Dentre os prédios similares, foram selecionados três em que o sistema de climatização é dado por centrais de água gelada. Dois deles apresentam sistemas de climatização similares, compostos por unidades evaporadoras laterais e controle de temperatura por termostato. O terceiro prédio é provido de um sistema moderno de climatização, o Climotion [77]. A solução Climotion foi desenvolvida a partir da percepção de efeitos colaterais frequentes de sistemas de ventilação projetados e operantes de forma inadequada. Nos sistemas convencionais, as diferenças de temperatura na mesma sala e a presença de substâncias contaminantes geram reclamações dos usuários relativas ao sistema de climatização. Com o passar do tempo, a demanda por sistemas de ventilação e climatização continua a crescer como consequência de maior exigência em relação à qualidade do ar e ao conforto térmico. Ao se tratar dos requisitos de climatização em um ambiente, é necessário levar em conta as seguintes necessidades:

- Garantir quantidade necessária de O₂;
- Atenuar quantidade de CO₂, odores e outros agentes, bem como remover contaminantes em processos produtivos;
- Prever dispersão de odores;
- Dissipar calor;
- Aumentar produtividade e eficiência em ambientes de trabalho;
- Otimizar consumo energético;
- Remover umidade;
- Garantir pureza do ar no ambiente.

Sendo assim, o sistema Climotion utiliza sensores de temperatura externa e interna, sensores de CO₂, umidade relativa do ar e controle de ventilação para garantir o atendimento de todos os pontos levantados acima. Portanto, a comparação entre um sistema com alto nível de automação como esse e os sistemas convencionais pode ser utilizada para aferir níveis similares de ganhos em eficiência energética atrelados à introdução de sensores e tecnologias inovadoras.

Utilizando os dados de consumo energético dos três prédios, durante o período de janeiro a julho de 2016, é possível comparar o consumo dos três prédios. Nota-se que os valores de consumo energético, dados em p.u., variam de acordo com as faixas de temperatura, como pode ser observado na figura abaixo. O prédio com sistema Climotion, chamado de Prédio 3, apresenta níveis de consumo energético inferiores aos demais nas faixas de temperatura inferiores a 25°C. Isso permite observar que o controle da climatização realizado com base nos valores de temperatura externa traz ganhos em eficiência energética para o sistema.

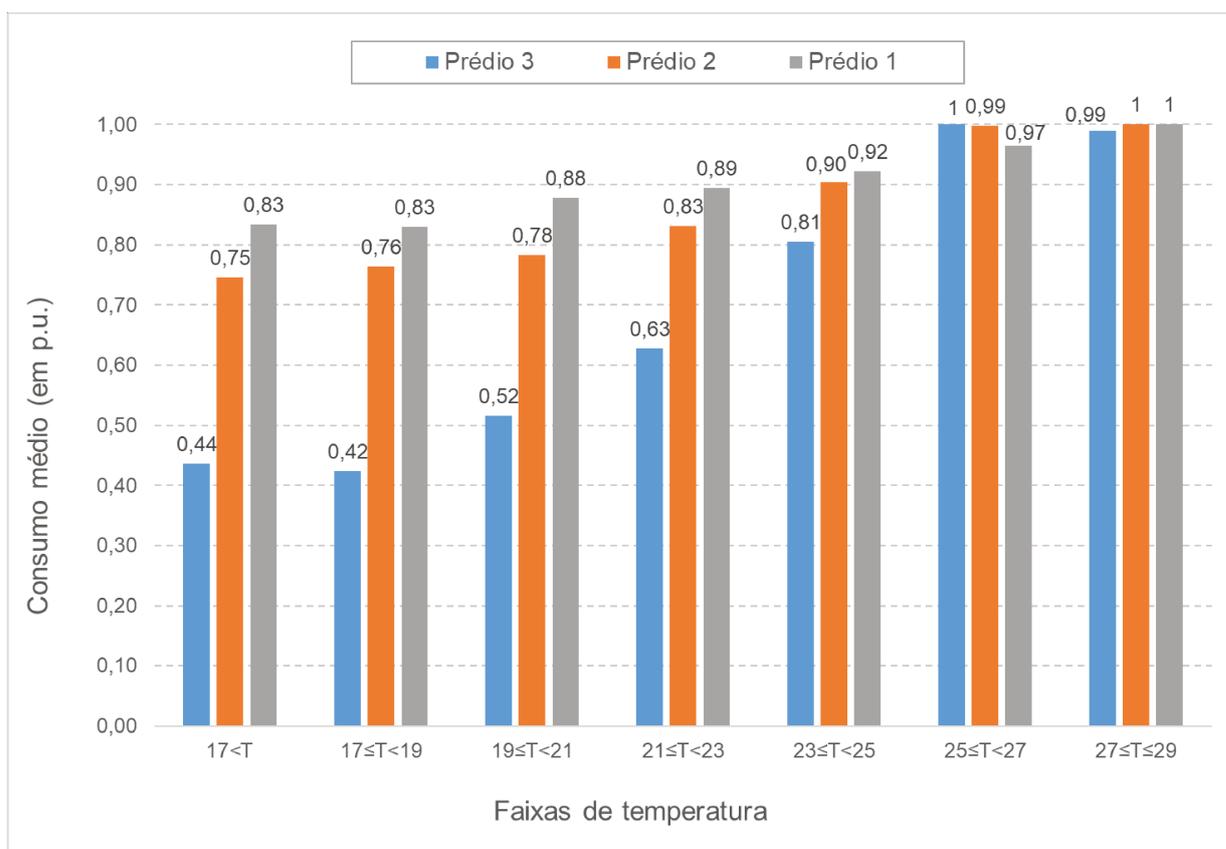


Figura 40. Valores de consumo de energia elétrica em p.u. por faixas de temperatura. Comparação de valores de consumo médio em p.u. entre prédios com sistemas de climatização centralizados (prédio 1 e 2) com o sistema Climotion instalado no prédio 3.

Além disso, é possível calcular que o sistema Climotion (que possui controle por temperatura externa e umidade relativa do ar) é, em média, 24% mais eficiente do que os sistemas convencionais instalados nos outros prédios. Esse valor de eficiência é próximo do valor calculado por estimativa atrelado ao sistema proposto nesta pesquisa. Entretanto, o sistema proposto possui a vantagem de possuir a opção de incluir o sensor de presença, trazendo ganhos significativos para áreas de uso esporádico, como salas de reunião.

4.2 RESULTADOS DA PESQUISA

Dado o caráter inovador da pesquisa apresentada, foi realizada a contratação de um serviço oferecido por um escritório de propriedade intelectual para analisar a possibilidade de depósito de patente da invenção proposta. Na análise de documentos relevantes identificados na busca por patentes existentes, foram encontradas algumas invenções que possuíam, em níveis diferentes de aprofundamento, alguns aspectos característicos semelhantes ao desta pesquisa, tais como: sistemas de controles voltados para aparelhos de ar condicionado, dispositivos ca-

pazes de receber sinais “Wi-Fi” e traduzi-los para sinal infravermelho, dispositivos interconectados por uma rede Mesh e dispositivos fixados de forma não invasiva a um aparelho ou saída de ar condicionado.

Entretanto, a pesquisa apresenta algumas características que resultam em efeitos e vantagens técnicas não óbvias para um técnico no assunto a partir dos ensinamentos revelados nas patentes previamente identificadas. Não obstante, ao fazer a comparação com as patentes depositadas com propósitos similares, as diferenças e detalhes provenientes desta foram claramente relevantes ao promover efeitos e vantagens técnicas funcionais, como:

- A pesquisa é construída com base no protocolo de comunicação que permite sua fácil expansão devido à não necessidade de estarem todos presentes no raio de alcance da central de comando, bastando que um dispositivo receba o sinal da central para transmitir aos demais. Todos os componentes atuam como roteadores. Todos os componentes podem entrar no modo “sleep”, reduzindo o consumo de energia;
- A solução é modularizável e futuras melhorias (como acesso à internet, controle e monitoramento à distância, computação em nuvem) podem ser introduzidas ao projeto;
- A central de comando proposta é composta por display LCD e botões que permitem o a operação do sistema *in loco*, não dependendo de smartphone, tablet, ou computadores com acesso à internet para ser operada;
- A central de comando é inteligente e agrega funcionalidades ao sistema de climatização, tornando possível o controle dos períodos de funcionamento por meio de calendário e relógio disponíveis. A inteligência do sistema consiste em interpretar dados em tempo real, atuar com base nestes dados e informar ao usuário as tomadas de decisões realizadas pelo sistema;
- A instalação de todos os componentes não exige pontos de acesso à internet ou cabos que conectem os componentes uns aos outros, sendo totalmente invasiva.

Com base no levantamento das invenções já existentes e no apontamento das vantagens técnicas presentes na solução proposta desta pesquisa, foi possível o depósito de patente número BR 10 2016 023243 0, junto ao Instituto Nacional da Propriedade Intelectual em 05/10/2016.

5 CONCLUSÕES

A ideia inicial da pesquisa envolvia a resolução de um problema presente em inúmeras edificações no Brasil. Dada a nossa característica climática, em praticamente todos os edifícios comerciais se faz presente um aparelho de ar condicionado. Independentemente do modelo escolhido, o aparelho de ar condicionado não é mais um item de ostentação em grandes escritórios ou casas luxuosas. Tal fato é concretizado pelo estudo já apresentado em [3], que indica um salto no índice de posse dos equipamentos de ar condicionado por domicílio para um valor de 0,76 em 2024.

Da mesma forma que se espera um crescimento nas instalações de aparelhos de ar condicionado, espera-se que as tecnologias IoT passem a fazer parte cada vez mais de nosso cotidiano. Dentre as inúmeras aplicações da IoT apontadas ao longo deste estudo, foram destacados a evolução construtiva dos edifícios e o surgimento de um novo conceito de edificação, denominado “edifícios inteligentes”. Nesses ambientes responsivos, a tecnologia passará a ter um papel maior do que a simples automação com a qual estamos acostumados. Os ambientes serão capazes de prever nossas necessidades e de responder aos nossos comandos. Além disso, a inteligência presente nessas construções permitirá o aprendizado evolutivo e aumento da eficiência energética no uso das utilidades.

Como passamos cerca de 90% do nosso tempo dentro de edifícios realizando atividades de lazer, estudos ou entretenimento, é necessário combinar as possibilidades oferecidas pela IoT com a necessidade de atender ao crescimento da demanda por consumo de energia. Em nossa pesquisa, foi dada ênfase para o desenvolvimento de uma solução que pudesse combinar simultaneamente os aspectos da climatização artificial por meio dos aparelhos de ar condicionado, IoT e edifícios inteligentes através de uma inovação.

A solução proposta conseguiu solucionar os problemas encontrados no sistema de climatização através do retrofit tecnológico de equipamentos de ar condicionado. Diariamente, os usuários precisavam ligar manualmente todos os cassetes de ar condicionado do escritório. Além disso, a temperatura de operação era selecionada sem nenhuma base teórica, ficando a cargo da sensação de conforto térmico da pessoa que o ligasse. Em dias quentes, os usuários costumavam alterar a temperatura dos cassetes de ar condicionado para valores abaixo de 24°C, implicando em maior consumo energético. Além disso, os cassetes de ar condicionado sobrecarregavam os chillers centrais, aumentando a frequência das manutenções preventivas. Aliás, se não fossem alterados no dia seguinte para a temperatura padrão, esses aparelhos continuavam a operar com uma temperatura de *set-point* abaixo do desejado. Portanto, os problemas solucionados através da tecnologia proposta foram: eliminar a dependência dos usuários para acionamento dos cassetes de ar condicionado; estabelecer e manter um *set-point* de temperatura de operação padrão; reduzir o consumo de energia elétrica; e criar uma central para comandar todos os aparelhos em um mesmo prédio.

O projeto propõe uma solução fisicamente aplicável, ou seja, é levado em conta o tamanho do equipamento utilizado para o estudo de caso, bem como a infraestrutura do local escolhido. Por exemplo, uma solução que utilizasse comunicação por fio seria muito adversa devido à disposição dos cassetes de ar condicionado ao longo do escritório, sem contar o impacto que a obra traria ao cotidiano dos usuários. Considerando os períodos de utilização do sistema de ar condicionado, a solução é flexível o suficiente para permitir uma fácil configuração dos horários de funcionamento dos aparelhos. A central de comunicação permite que o usuário escolha os horários de operação do sistema e possa realizar pequenos ajustes sem a necessidade de reprogramar os dispositivos. Por fim, para evitar a perda de garantia dos cassetes de ar condicionado, uma solução não intrusiva seria a melhor escolha.

O sistema proposto foi validado por meio de um estudo de caso que contou com a instalação do sistema em dois aparelhos de ar condicionado. A central de comando foi instalada em uma sala de acesso restrito. A distância entre os aparelhos de ar condicionado e a central seria um problema caso o roteamento da informação não fosse possível. Os aparelhos foram instalados em ambientes diferentes, separados por paredes do tipo drywall, o que não afetou a comunicação entre os dispositivos. Após a configuração inicial do relógio do sistema, registrou-se que os aparelhos de ar condicionado deveriam ser acionados às 07:00 e desligados às 17:00. Após os períodos de testes, os aparelhos foram acionados e desligados nos horários programados. Inspeções realizadas aos finais de semana encontraram os aparelhos desligados. O controle de energia realizado pelos PLCs permitiu que os aparelhos não fossem acionados em feriados. Caso não existisse o controle por PLCs, seria necessário adicionar na programação do sistema uma lista com as datas de feriados, bloqueando o acionamento dos aparelhos nesses dias.

Assim, conclui-se que a proposta é capaz de centralizar o comando dos aparelhos e oferece controles adicionais na operação dos aparelhos de ar condicionado, como controle via sensor de presença e determinação da temperatura de operação através do sensor de temperatura e umidade relativa. Além disso, o sistema mostra-se como uma importante ferramenta para o controle de sistemas de refrigeração através do uso de sensores e atuadores.

Após os testes realizados com o estudo de caso, o sistema proposto mostrou-se viável e com alta facilidade no que diz respeito à instalação de seus componentes. Durante o período em que permaneceu instalado, a estimativa de economia de energia é de 22% em relação aos sistemas convencionais de climatização. Esta estimativa é compatível com a de sistemas avançados de climatização, como o Climotion aqui apresentado, e que utilizam sensores como dados de entrada para configuração dos ajustes de ventilação e temperatura de operação. Além dos ganhos energéticos, a pesquisa também trouxe uma inovação no campo de aplicações de IoT em edifícios inteligentes. Com base no desenvolvimento do protótipo aqui apresentado, foi realizado o depósito de patente do módulo de comando dos aparelhos de ar condicionado junto ao INPI sob o número BR 10 2016 023243 0.

6 TRABALHOS FUTUROS

As oportunidades oferecidas pelas tecnologias da IoT são inúmeras e crescentes, dado o constante avanço tecnológico. Como sugestões de trabalhos futuros ficam a conexão do sistema à internet através de módulos como o shield Ethernet e a medição em campo para poder comparar o consumo de eletricidade de um aparelho integrado à rede e outro não integrado. Após a instalação de mais módulos, será viável uma comparação dos índices históricos de consumo de energia elétrica, tornando possível o cálculo do retorno financeiro da solução.

Além disso, a pesquisa deu origem a publicação de dois artigos científicos. O artigo “Rede de sensores e atuadores sem fio para o controle de sistemas de climatização: uma aplicação de internet das coisas em edifícios inteligentes” apresentado durante o Seminário em Tecnologia da Informação Inteligente – SETII 2016, teve como foco o desenvolvimento da rede de sensores e atuadores sem fio, apresentando os principais desafios e tecnologias utilizadas.

Por outro lado, o artigo “Retrofit of air conditioning systems through an Wireless Sensor and Actuator Network. An IoT-based application for smart buildings” foi publicado durante o evento internacional “14th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control” realizado em maio de 2017 na cidade de Calabria, Itália. O artigo dá destaque para a inteligência agregada ao sistema convencional de climatização, tendo como ênfase a proposta de retrofit a baixo custo dos aparelhos de ar condicionado.

REFERÊNCIAS

- [1] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, IEA. **Transition to sustainable buildings – Strategies and opportunities to 2050**. 2013.
- [2] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE. **Balanco Energético Nacional 2015: ano base 2014**. 2015. Rio de Janeiro: EPE.
- [3] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE. **Demanda de Energia 2050**. 2014. Rio de Janeiro: EPE.
- [4] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, MME. **Plano Nacional de Eficiência Energética – Premissas e Diretrizes Básicas**. 2011. Brasília.
- [5] EUROPEAN COMMISSION. **ICT for a low carbon economy – Smart Buildings**. Disponível em: <http://ec.europa.eu/information_society/activities/sustainable_growth/docs/sb_publications/smartbuildings-ld.pdf>. Acesso em 22 março 2017.
- [6] BORGIA, E. **The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues**. Em Computer Communications. Vol. 54. 2014, pp 1-31.
- [7] ASHTON, K.. **That “Internet of Things” Thing**. Em RFID Journal. 2009.
- [8] EVANS, D. **A internet das Coisas – Como a próxima evolução da Internet está mudando tudo**. CISCO IBSG, 2011.
- [9] VERMESAN O., FRIESS P., GUILLEMIN P., GUSMEROLI S., SUNDMAEKER H., BASSI A., JUBERT I., MAZURA M., HARRISON M., EISENHAUER M. & DOODY P. **Internet of Things Strategic Research Roadmap [Online]**. IoT European Research Cluster. 2011. Disponível em: < http://www.internet-of-things-research.eu/pdf/IoT_Cluster_Strategic_Research_Agenda_2011.pdf >. Acesso em 02 maio 2017.
- [10] MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE. **The internet of things: mapping the value beyond the hype. 2015**. Disponível em: <<http://www.mckinsey.com/business-functions/digital-mckinsey/our-insights/the-internet-of-things-the-value-of-digitizing-the-physical-world>>. Acesso em 20 abril 2017.
- [11] VIOLINO, B. **The history of RFID technology**. Em RFID Journal. 2005.
- [12] FALUDI, R. **Building Wireless Sensor Networks**. – California: O’Reilly Media, 2010.
- [13] IEEE Computer Society. **IEEE Standard for Ethernet – IEEE Std 802.3™ -2015**. Disponível em: < <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.3.html> >. Acesso em 16 maio 2017.
- [14] IEEE Computer Society. **IEEE 802.11™ Wireless LANs**. 2012. Disponível em: < <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html>>. Acesso em 10 maio 2017.

- [15] DIGI INTERNATIONAL. **Wireless Mesh Networking ZigBee® vs. DigiMesh™**. 2008. Disponível em: <https://www.digi.com/pdf/wp_zigbeevsdigimesh.pdf>. Acesso em 16 maio. 2017.
- [16] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE. **ETSI TS 102 689 V1.2.1. Machine-to-Machine communications (M2M); M2M service requirements**. 2013. Disponível em: <http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102600_102699/102689/01.02.01_60/ts_102689v010201p.pdf>. Acesso em 05 abril. 2017.
- [17] GALACHE J., PAVIA D., YONEZAWA T., GRELLA M., GURGEN L. & MAEOMICH H. **ClouT: Leveraging Cloud computing techniques for improving management of massive IoT data**. Em IEEE 7th International Conference on Service-Oriented Computing and Applications, Matsue. 2014, pp. 324-327.
- [18] FELL, M. **Roadmap for the emerging Internet of Things**. Carré & Strauss. 2014. Disponível em: <http://carre-strauss.com/documents/IoT_Roadmap.pdf>. Acesso em 18 Maio. 2017.
- [19] LEITE C., MARQUES J. **Cidades sustentáveis, cidades inteligentes: desenvolvimento sustentável num planeta urbano**. – Porto Alegre: Bookman, 2012.
- [20] UNITED NATIONS. **Report of the world commission on environment and development: our common future**. 1987.
- [21] ABDENNADHER I., KHABOU N., RODRIGUEZ I. B., JMAIEL M., **Designing energy efficient Smart Buildings in ubiquitous environments**, 15th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), Marrakech, 2015, pp. 122-127.
- [22] BATOV, E. I. **The distinctive features of “smart” buildings**. Em XIV R-S-P seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (24RSP) (TFoCE 2015). Procedia Engineering, Vol. 111, pp 103-107. 2015.
- [23] BROWN, S. **Graduating from smart to intelligent buildings**. Em Consulting-Specifying Engineer, 28-34. 2015.
- [24] KOLOKOTSA, D. **The role of smart grids in the building sector**. Em Energy and Buildings. Vol. 116, pp 703-708. 2015.
- [25] T.K.L. HUI, et al. **Major requirements for building smart homes in smart cities based on internet of things technologies**. Em Future Generation Computer Systems. 2016.
- [26] T. PERUMAL, A.R. RAMLI, C.Y. LEONG, S. MANSOR, K. SAMSUDIN. **Interoperability among heterogeneous system in smart home environment**. Em 22nd International Conference on Signal Image Technology and Internet Based Systems, SITIS'08. 2008, pp. 177-186.
- [27] Y.-G. HA, Y.-C. BYUN. **A ubiquitous homecare service system using a wearable user interface device**. Em IEEE/ACIS 11th International Conference on Computer and Information Science, ICIS. 2012, pp. 649-650.

- [28] C.S.S. TAN, J. SCHÖNING, K. LUYTEN, K. CONINX. **Informing intelligent user interfaces by interfering affective states from body postures in ubiquitous computing environments.** Em Proceedings of the International Conference on Intelligent User Interfaces. IUI'13, ACM, New York, NY. USA. 2013, pp. 235-246.
- [29] I. BISIO, A. DELFINO, F. LAVAGETTO, M. MARCHESE, A. SCIARRONE. **Gender-driven emotion recognition through speech signals for ambient intelligence applications.** IEEE Trans. Emerg. Top. Comput. 1 (2). 2013, pp. 244-257.
- [30] H. V. ROCHA, M. C. C. BARANAUSKAS. **Design e Avaliação de interfaces humano-computador.** Universidade Estadual de Campinas. 2003.
- [31] J. CORN. **User Unfriendly: Consumer Struggles with Personal Technologies, from Clocks and Sewing Machines to Cars and Computers.** The John Hopkins University Press. 2001.
- [32] K. ISLAM, W. SHEN, X. WANG. **Security and privacy considerations for wireless sensor networks in smart home environments.** Em IEEE International Conference on Big Data, Big Data. 2014. pp.1-8.
- [33] MARTIRANO, L. **A smart lighting control to save energy.** The 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Application. 2011. pp. 132-138.
- [34] JAN DENNEMAN. **The Global Voice of the Lighting Industry.** GLF. Sydney. 2011.
- [35] M. CASTRO, A. J. JARA E A. F. G. SKARMETA. **Smart Lighting Solutions for Smart Cities.** 2013 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, Barcelona. 2013. pp. 1374-1379.
- [36] R. F. FERNANDES, C. C. FONSECA, D. BRANDÃO, P. FERRARI, A. FLAMMINI E A. VEZZOLI. **Flexible Wireless Sensor Network for smart lighting applications.** IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, Montevideo. 2014. pp. 434-439.
- [37] AMERICAN COUNCIL FOR AN ENERGY-EFFICIENT ECONOMY – ACEEE. **Small actions that add up to large energy savings for Earth Day.** 2014. Disponível em <<http://aceee.org/blog/2014/04/small-actions-add-large-energy-saving>>. Acesso em 18 Maio. 2017.
- [38] S. A. R. ZAIDI, A. IMRAN, D. C. MCLERNON E M. GHOGHO. **Enabling IoT empowered smart lighting solutions: A communication theoretic perspective.** IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW). Istanbul. 2014, pp. 140-144.
- [39] ELETROBRAS. PROCELINFO . **Avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil: pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso – ano base 2005 – classe residencial.** 2007.

- [40] V. BOONSAWAT, J. EKCHAMANONTA, K. BUMRUNGKHET, E. S. KITTIPIYAKUL. Xbee wireless sensor networks for temperature monitoring. Em 2nd ECTI-Conference on Application Research and Development, Pattaya, Chonburi, Thailand, 10-12 May 2010.
- [41] D. SKLAVOUNOS, E. ZERVAS, O. TSAKIRIDIS E J. STONHAM. **A wireless sensor network approach for the control of a multizone HVAC system.** Power, Energy and Control (ICPEC). International Conference on, Sri Rangalatchum Dindigul. 2013, pp. 153-158.
- [42] I. ABDENNADHER, N. KHABOU, I. B. RODRIGUEZ E M. JMAIEL. **Designing energy efficient Smart Buildings in ubiquitous environments.** 15th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), Marrakech. 2015, pp. 122-127.
- [43] C. KAMIENSKI ET AL. **Context-aware energy efficiency management for smart buildings.** IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT). Milan. 2015, pp. 699-704.
- [44] D. KOLOKOTSA. **The role of smart grids in the building sector.** Energy and Buildings. 2016. Vol. 116, pp 703-708.
- [45] R. K. JAIN, K.M. SMITH, P.J. CULLIGAN, J.E. TAYLOR, **Forecasting energy consumption of multi-family residential buildings using support vector regression: Investigating the impact of temporal and spatial monitoring granularity on performance accuracy.** Appl. Energy 123. 2014. 168-178.
- [46] AMERICAN COUNCIL FOR AN ENERGY-EFFICIENT ECONOMY – ACEEE (2014). **Small actions that add up to large energy savings for Earth Day.** Disponível em <<http://aceee.org/blog/2014/04/small-actions-add-large-energy-saving>>. Acesso em 18 Maio. 2017.
- [47] S. BANDARA, T. YASHIRO, N. KOSHIZUKA AND K. SAKAMURA. **Access control framework for API-enabled devices in smart buildings.** Em 22nd Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), Yogyakarta. 2016. pp. 210-217.
- [48] P. IONESCU. **Is Your Smart Office Creating Backdoors for Cybercriminals?.** Disponível em <<https://securityintelligence.com/author/paul-ionescu/>>. Acesso em 18 Maio. 2017.
- [49] B. U. T'REYIN, Y. DEDEOGLU, U. GÜDÜKBAY, E A. E. CETIN. **Computer vision based method for real-time fire and flame detection.** Em Pattern recognition letters. 2006. vol. 27, n.1, pp. 49-58.
- [50] R. TOMASTIK, Y. LIN, E A. BANASZUK. **Video-based estimation of building occupancy during emergency egress.** Em American Control Conference IEEE. 2008, pp 894-901.
- [51] C. THOMPSON, J. WHITE, B. DOUGHERTY, A. ALBRIGHT, AND D. C. SCHMIDT. **Using smartphones to detect car accidents and provide situational awareness to emergency responders.** Em Mobile Wireless Middleware, Operating Systems and Applications. Springer, 2010, pp. 29-42.
- [52] A. PISCITELLO, F. PADUANO, A. A. NACCI, D. NOFERI, M. D. SANTAMBROGIO AND D. SCIUTO. **Danger-system: Exploring new ways to manage occupants safety**

in smart building. IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Milan. 2015. pp. 675-680.

[53] L. BADGER, T. GRANCE, R. PATT-CORNER, AND J. VOAS. **DRAFT Cloud Computing Synopsis and Recommendations.** NIST Special Publication 800-146, Maio 2011.

[54] M. SADIKU, S. MUSA, O. MOMOH. **Cloud Computing: Opportunities and Challenges.** Potentials, IEEE (Volume: 33, Issue:1). Fevereiro 2014.

[55] N. MOHAMED, S. LAZAROVA-MOLNAR AND J. AL-JAROODI. **SBDaaS: Smart building diagnostics as a service on the cloud.** 2016 2nd International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), Prague, 2016, pp. 1-6

[56] E. CARRILLO, V. BENITEZ, C. MENDOZA AND J. PACHECO. **IoT framework for smart buildings with cloud computing.** IEEE First International Smart Cities Conference (ISC2), Guadalajara. 2015, pp. 1-6.

[57] UNIÃO EUROPEIA. CORDIS. 2015. Fonte: Community Research and Development Information Service: http://cordis.europa.eu/fp7/ict/home_en.html

[58] E2REBUILD. Disponível em <http://www.e2rebuild.eu/en/Sidor/default.aspx>. Acesso em 08 Dezembro 2016.

[59] BUILDSMART. (30 de Setembro de 2015). Disponível em <<http://www.buildsmart-energy.eu>>. Acesso em 08 Dezembro 2016.

[60] MICROSOFT. (15 de Outubro de 2015). Energy-smart buildings. Disponível em <<http://www.microsoft.com/en-us/energysmartbuildings>>. Acesso em 08 Dezembro 2016.

[61] Institute for building efficiency. (Outubro de 31 de 2015). Disponível em Smart building: <<http://www.institutebe.com/smart-grid-smart-building.aspx>>. Acesso em 08 Dezembro 2016.

[62] The 5 targets for the EU in 2020. Disponível em: http://ec.europa.eu/europe2020/targets/eu-targets/index_en.htm

[63] A. J. Morán, P. Profaizer, M. H. Zapater, M. A. Valdavidia and I. Z. Bribián, “Information and Communications Technologies (ICTs) for energy efficiency in buildings: Review and analysis of results from EU pilot projects,” 2016, Energy and Buildings, vol. 127, pp 128-137.

[64] HosPilot, disponível em <http://www.hospilot.eu/>. Acesso em 08 Dezembro 2016.

[65] LAMBERTS, R. **Desempenho térmico de edificações.** UFSC. Florianópolis, 2016.

[66] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7730:2005, **Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.** 2005.

[67] ELEKTRO. **Eficiência Energética: fundamentos e aplicações.** Campinas, 2012.

- [68] EVERLIGHT ELECTRONICS. **Technical datasheet – Infrared Remote-Control Receiver Module.** Disponível em <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/118042/EVERLIGHT/IRM-8751.html>>. Acesso em 17 junho 2017.
- [69] BIBLIOTECA IRREMOTE. Disponível em <<https://github.com/z3t0/Arduino-IRremote>>. Acesso em 19 Outubro 2016.
- [70] LIBELIUM. **XBee firmware from 802.15.4 to DigiMesh Tutorial.** Disponível em <<http://www.libelium.com/development/waspmote/documentation/changing-the-xbee-firmware-from-802-15-4-to-digimesh/>>. Acesso em 20 Junho 2017.
- [71] ARDUINO E CIA. **Módulo I2C display 16x2 Arduino.** Disponível em: <<http://www.arduinoecia.com.br/2014/12/modulo-i2c-display-16x2-arduino.html>>. Acesso em 20 junho 2017.
- [72] BRUNIALTI. **Biblioteca MENWIZ.** Disponível em: <https://github.com/brunialti/MENWIZ/blob/master/MENWIZ_1_2_QUICK_TOUR.pdf>. Acesso em 20 junho 2017.
- [73] MAXIM INTEGRATED. **DS1307 64x8, Serial, I2C Real-Time Clock.** Disponível em <<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1307.pdf>>. Acesso em 25 junho 2017.
- [74] D-ROBOTICS. **DHT11 Humidity & Temperature Sensor.** Disponível em <<http://www.micropik.com/PDF/dht11.pdf>>. Acesso em 26 junho 2017.
- [75] NATIONAL WEATHER SERVICE. **The heat index equation.** Disponível em <http://www.wpc.ncep.noaa.gov/html/heatindex_equation.shtml>. Acesso em 26 junho 2017.
- [76] AMERICAN COUNCIL FOR AN ENERGY-EFFICIENT ECONOMY – ACEEE. **Small actions that add up to large energy savings for Earth Day.** 2014. Disponível em <<http://aceee.org/blog/2014/04/small-actions-add-large-energy-saving>>. Acesso em 06 Setembro 2016.
- [77] ROBERT BOSCH GMBH. **Climotion System Planner’s Guide for HVAC Engineers.** 2015.

**ANEXO A – CÓDIGO PARA IDENTIFICAÇÃO DE COMANDOS INFRAVERMELHO
TESTE INICIAL**

```

/*
Este código recebe o sinal de infra vermelho no pino 5 (necessita ser um pino
PWM) e coleta o código responsável para cada comando. A sequência de valores
pode ser vista no Serial Monitor do Arduino.
*/

#include <IRremote.h>

/*
* Utilizar o pino D5 para conectar o receptor IR.
*/
int RECV_PIN = 5;

IRrecv irrecv(RECV_PIN);

decode_results results;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  irrecv.enableIRIn(); // Inicialização do pino receptor
}

void dump(decode_results *results) {
  // Dumps out the decode_results structure.
  // Call this after IRrecv::decode()
  int count = results->rawlen;
  if (results->decode_type == UNKNOWN) {
    Serial.print("Unknown encoding: ");
  }
  else if (results->decode_type == NEC) {
    Serial.print("Decoded NEC: ");
  }

  }
  else if (results->decode_type == SONY) {
    Serial.print("Decoded SONY: ");
  }
  else if (results->decode_type == RC5) {
    Serial.print("Decoded RC5: ");
  }
  else if (results->decode_type == RC6) {
    Serial.print("Decoded RC6: ");
  }
  else if (results->decode_type == PANASONIC) {
    Serial.print("Decoded PANASONIC - Address: ");
    Serial.print(results->address, HEX);
    Serial.print(" Value: ");
  }
  else if (results->decode_type == LG) {
    Serial.print("Decoded LG: ");
  }
  else if (results->decode_type == JVC) {
    Serial.print("Decoded JVC: ");
  }
}

```

```

else if (results->decode_type == AIWA_RC_T501) {
    Serial.print("Decoded AIWA RC T501: ");
}
else if (results->decode_type == WHYNTER) {
    Serial.print("Decoded Whynter: ");
}
Serial.print(results->value, HEX);
Serial.print(" (");
Serial.print(results->bits, DEC);
Serial.println(" bits)");
Serial.print("Raw (");
Serial.print(count, DEC);
Serial.print("): ");

for (int i = 1; i < count; i++) {
    if (i & 1) {
        Serial.print(results->rawbuf[i]*USECPERTICK, DEC);
    }
    else {
        Serial.write('-');
        Serial.print((unsigned long) results->rawbuf[i]*USECPERTICK, DEC);
    }
    Serial.print(" ");
}
Serial.println();
}

void loop() {
    if (irrecv.decode(&results)) {
        Serial.println(results.value, HEX);
        dump(&results);
        irrecv.resume(); // Recebe próximo valor
    }
}

```

**ANEXO B – CÓDIGO PARA ENVIO DE SINAIS INFRAVERMELHOS
TESTE INICIAL**

/* O código abaixo é utilizado para realizar o teste de envio de comandos infravermelhos para um aparelho de ar condicionado. As sequências gravadas como ligar e desligar foram previamente obtidas através do código do Anexo A. Ao ser carregado no Arduino, o usuário deve enviar um sinal IR qualquer para o receptor IR do circuito elétrico acoplado ao Arduino. O código identifica este sinal e envia o comando para ligar o ar condicionado ou desligar o ar condicionado, caso este já esteja ligado.
*/

```
#include <IRremote.h>
IRsend irsend;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  char comando = Serial.read();
  if(comando == 'l'){
    ligaAr();
  }
  if(comando == 'd'){
    desligaAr();
  }
}

void ligaAr(){
  unsigned int ligaAr[276] =
  {4700,2400,550,650,550,600,550,650,550,1800,550,650,550,650,550,650,550,650,
  550,650,550,600,550,650,550,650,550,1800,550,650,550,600,550,650,550,1800,
  550,1800,600,1750,550,600,550,650,550,650,550,650,550,650,550,650,550,1800,
  550,650,550,600,550,650,550,650,550,600,550,650,550,600,550,650,550,
  650,550,650,550,650,550,1800,550,650,550,650,550,600,550,650,550,1800,550,
  650,550,650,550,600,550,650,550,1800,550,650,550,600,550,650,550,600,550,60
  0,550,650,550,650,550,650,550,600,550,650,550,1800,550,1800,550,600,550,650
  ,550,650,550,600,550,650,550,600,550,1800,550,600,550,650,550,650,550,600,5
  50,650,550,650,550,650,550,650,550,650,550,1800,550,1800,550,650,550,650,55
  0,600,550,650,550,650,500,650,550,650,550,650,550,650,550,650,550,650,550,6
  00,550,650,550,550,650,550,600,550,650,550,650,550,650,550,600,550,650,550,600,
  550,650,550,600,550,650,550,650,550,600,550,650,550,650,550,650,550,650,550,600,550
  ,650,550,600,550,600,550,650,550,650,550,1800,600,1800,550,650,550,1800,550
  ,1800,550,1850,550,650,550,650,550,1800,550,650,550,1800,550,1800,600,1800,
  550,650,550,600,550,1850,600,600,550,650,550,1800,550,1800,550,650,550,1800
  ,550,};
  irsend.sendRaw(ligaAr,276,38);
  Serial.println("Ligar");
}

void desligaAr(){
  unsigned int desligaAr[276] =
  {4700,2400,600,600,550,650,550,600,550,1800,600,600,550,650,550,650,550,600
  ,550,650,550,600,550,650,550,650,550,1800,550,600,550,600,550,600,550,1800,
  600,1800,550,1800,550,650,550,600,550,650,550,650,550,600,550,650,550,1800,
  600,650,550,650,550,650,550,600,550,650,550,650,550,600,550,650,550,650,550,
  600,550,600,550,600,550,1800,550,650,550,650,550,650,550,600,550,1800,550,
  600,550,650,550,550,600,550,650,550,1800,550,650,550,650,550,650,550,650,550,65
  0,550,650,550,600,550,650,550,650,550,650,550,1800,550,600,550,650,550,650,
  550,650,550,650,550,650,550,600,550,1800,600,650,550,650,550,650,550,650,55
  0,650,550,600,550,650,550,650,550,600,550,1800,600,1800,550,650,550,600,550
  ,600,550,650,550,650,550,600,550,600,550,650,550,600,550,650,550,650,550,65
  0,550,650,550,600,550,650,550,650,550,650,550,650,550,650,550,650,550,600,5
  50,600,550,650,550,650,550,650,550,650,550,650,550,650,550,600,550,600,550,650,550,
```

```
650, 550, 650, 550, 650, 550, 650, 550, 600, 550, 1800, 600, 1800, 600, 650, 550, 1800, 600,  
1800, 550, 1800, 550, 1800, 550, 600, 550, 1800, 550, 600, 550, 650, 550, 1800, 600, 1800, 5  
50, 650, 550, 1800, 600, 1800, 550, 600, 550, 650, 550, 1800, 550, 1800, 550, 1800, 550, 650  
, 550, };  
irsend.sendRaw(desligaAr, 276, 38);  
Serial.println("Desligar");  
}
```

ANEXO C – CÓDIGO UTILIZADO PELA CENTRAL DE COMUNICAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO

/* Criado por Bruno Eduardo Medina em 14/08/2016
 Sistema baseado em IoT para controle das unidades evaporadoras de ar condicionado conectados a chillers centrais nos escritorios da Bosch CaP.
 Este codigo deve ser carregado na central de comando da rede.
 Atraves deste codigo e possivel:

1. Desenhar um menu interativo a ser exibido no display LCD 20x4. A navegacao do menu e dada por 6 botoes:

- retornar/cancelar, esquerda, cima, baixo, direita, confirmar/salvar;
 O menu apresenta a seguinte estrutura:

a. Ligar/Desligar: permite armazenar em variaveis os horarios de liga/desliga escolhidos pelo usuario;

b. Hora atual: exhibe no display LCD o horario armazenado no RTC do módulo DS1307.

c. Temperatura AC: exhibe a temperatura de operacao do ar condicionado.

d. Ajustar hora: ajuste de horario e data do calendario RTC.

2. Codificacao das informacoes enviadas pela central de comando para todos os dispositivos.

O= Desligar ar condicionado

A= 18

B= 19

C= 20

D= 21

E= 22

F= 23

G= 24

J= receber temperatura de operacao do AC

V= ar condicionado fora do horario de operacao

X= ar condicionado dentro do horário de operacao

Y= envia codigo para ligar AC em 24 - funcao de teste

Z= envia codigo para desligar AC - funcao de teste

Envia 3 vezes o sinal pelo XBee para garantir o envio da informação
 Necessario delay entre o envio das informações

3. Códigos recebidos pela central de comando

a = comando do modulo sensor para acionar AC em 18

b = comando do modulo sensor para acionar AC em 19

c = comando do modulo sensor para acionar AC em 20

d = comando do modulo sensor para acionar AC em 21

e = comando do modulo sensor para acionar AC em 22

f = comando do modulo sensor para acionar AC em 23

g = comando do modulo sensor para acionar AC em 24

o = comando do modulo sensor para desligar o AC

4. Fluxograma

A central recebe o valor de operacao do AC, previamente definido pelo modulo sensor de temperatura.

A informacao e enviada a cada leitura de temperatura realizada pelo modulo.

A temperatura de operacao do AC e armazenada em uma variavel que muda o seu valor caso temperatura de operacao e alterada.

```

- AC está dentro de seu horário de operação?
  Y: Enviar comando de controle do AC.
  N: Aguardar horário.

- Horário de desligar AC?
  Y: Enviar comando de desligar.
  N: Aguardar horário

*/

//BIBLIOTECAS NECESSÁRIAS PARA O MENU
#include <LCD.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <buttons.h>
#include <MENWIZ.h>
#include <EEPROM.h>

//BIBLIOTECA COM TIMER
#include <Metro.h>

//RTC
#include <Wire.h>
#define DS1307_ADDRESS 0x68

// DEFINE OS PINOS DE NAVEGAÇÃO PARA O ARDUINO
#define UP_BOTTON_PIN 13
#define DOWN_BOTTON_PIN 12
#define LEFT_BOTTON_PIN 11
#define RIGHT_BOTTON_PIN 10
#define CONFIRM_BOTTON_PIN 9
#define ESCAPE_BOTTON_PIN 8

//CRIAR ÁRVORE DO MENU
menwiz tree;

// CRIA O OBJETO LCD UTILIZANDO A BIBLIOTECA LiquidCrystal lib
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);
byte zero = 0x00;

//HORÁRIO PADRÃO PARA LIGAR/DESLIGAR
int hora_liga=7;
int hora_desliga=18;
int minuto_liga=00;
int minuto_desliga=00;

//VARIÁVEIS PARA ARMAZENAR HORÁRIO CONFIGURADO PELO USUÁRIO NO REAL TIME
CLOCK - VALORES INICIAIS
byte user_minutos=15;
byte user_horas=10;
byte user_dia=16;
byte user_dia_semana=2;
byte user_mes=8;
byte user_ano=16;

//DADOS ENVIADOS OU RECEBIDOS PELO XBEE, SÃO ENVIADOS VIA BYTE. CODIFICAÇÃO
TRABALHA COM O VALOR ASCII DOS CÓDIGOS ENVIADOS
int recebido_byte;
int ultimo_byte;

```

```

//VARIÁVEL QUE ARMAZENA ÚLTIMO VALOR DE TEMPERATURA DE OPERAÇÃO DO AR CON-
CONDICIONADO
int temperatura_AC;

//VARIABLE QUE ARMAZENA O TEMPO DO TIMER DE ATUALIZAÇÃO DE TEMPERATURA DO
AR CONDICIONADO
Metro timerComando = Metro(120000); //2 MINUTOS=120.000

//VARIABLES DE MANIPULAÇÃO DO AR CONDICIONADO
int tAC_atual=0; //temperatura de operacao do ar condicionado mais recente
lida
int tAC_previo=0; //temperatura de operacao do ar condicionado previa
int tAC_op=0; //temperatura em que o ar condicionado esta operando
int AC_On=false; //armazena se o ar condicionado, pode ligar ou nao
int estadoAC=false; //armazena estado do ar condicionado, ligado ou nao

// SETUP
void setup(){
  //SETUP DO VISOR LCD
  Wire.begin();
  Serial.begin(9600);
  lcd.begin (20,4);

  //TIRAR O COMENTÁRIO DA LINHA ABAIXO CASO QUEIRA ALTERAR VIA PROGRAMA O
HORÁRIO DO RTC
  //SelecionaDataeHora();

  //ESTRUTURAÇÃO DO MENU
  _menu *r,*s1,*s2; // DOIS NÍVEIS DE MENU
  tree.begin(&lcd,20,4); //DECLARA O OBJETO LCD E O TAMANHO DA TELA declara o
objeto do LCD e o tamanho da tela - necessário para o menwiz lib

  //MENU PRINCIPAL
  r=tree.addMenu(MW_ROOT,NULL,F("CENTRAL"));

  //SUBMENU QUE RECEBE O HORÁRIO PARA LIGAR O AC
  s1=tree.addMenu(MW_SUBMENU,r, F("Horario Ligar")); //ADICIONA NÓ TER-
MINAL NA ÁRVORE DO MENU, DEFINIR HORÁRIO LIGAR - nó 1
  s2=tree.addMenu(MW_VAR,s1, F("Horas - ligar")); //adiciona nó do
tipo terminal na árvore do menu - nó 5
  s2->addVar(MW_AUTO_INT,&hora_liga,0,23,1); //define o va-
lor da variável hora_desliga
  s2=tree.addMenu(MW_VAR,s1, F("Minutos - ligar")); //adiciona nó do tipo
terminal na árvore do menu - nó 6 s2->addVar(MW_AUTO_INT,&minuto_des-
liga,00,59,1); //define o valor da variável minuto_desliga
  s2->addVar(MW_AUTO_INT,&minuto_liga,0,59,1);

  //SUBMENU QUE RECEBE O HORÁRIO PARA DESLIGAR O AC
  s1=tree.addMenu(MW_SUBMENU,r, F("Horario Desligar")); //adiciona nó
do tipo submenu na árvore do menu - nó 4
  s2=tree.addMenu(MW_VAR,s1, F("Horas - desligar")); //adiciona nó do
tipo terminal na árvore do menu - nó 5
  s2->addVar(MW_AUTO_INT,&hora_desliga,0,23,1); //define o valor da
variável hora_desliga
  s2=tree.addMenu(MW_VAR,s1, F("Minutos - desligar")); //adiciona nó
do tipo terminal na árvore do menu - nó 6

```

```

s2->addVar(MW_AUTO_INT,&minuto_desliga,00,59,1); //define o valor da
variável minuto_desliga

//NÓ DO TIPO TERMINAL QUE IRÁ EXIBIR TEMPERATURA AC NO DISPLAY LCD
s1=tree.addMenu(MW_VAR,r, F("Temperatura AC")); //adiciona nó do
tipo terminal na árvore do menu - nó 11
s1->addVar(MW_ACTION,temp_AC); //chama a função que
exibe o horário no display LCD

//NÓ DO TIPO TERMINAL QUE IRÁ EXIBIR O HORÁRIO NO DISPLAY LCD
s1=tree.addMenu(MW_VAR,r, F("Hora atual")); //adiciona nó do tipo
terminal na árvore do menu - nó 12
s1->addVar(MW_ACTION,horario); //chama a função que
exibe o horário no display LCD

//SUBMENU QUE IRÁ ALTERAR O HORÁRIO REGISTRADO NO RTC
s1=tree.addMenu(MW_SUBMENU,r, F("Alterar horario")); //adiciona nó do
tipo submenu na árvore do menu - nó 13
s2=tree.addMenu(MW_VAR,s1,F("Horas")); //adiciona nó do tipo
terminal na árvore do menu - nó 14
s2->addVar(MW_AUTO_BYTE,&user_horas,0,23,1); //define o valor de
horas: 0 a 23
s2=tree.addMenu(MW_VAR,s1,F("Minutos")); //adiciona nó do tipo
terminal na árvore do menu - nó 15
s2->addVar(MW_AUTO_BYTE,&user_minutos,0,59,1); //define o valor
de minutos: 0 a 59
s2=tree.addMenu(MW_VAR,s1,F("Dia")); //adiciona nó do tipo
terminal na árvore do menu - nó 16
s2->addVar(MW_AUTO_BYTE,&user_dia,1,31,1); //define o dia: 1 a
31
s2=tree.addMenu(MW_VAR,s1,F("Mes")); //adiciona nó do tipo
terminal na árvore do menu - nó 17
s2->addVar(MW_AUTO_BYTE,&user_mes,1,12,1); //define o valor do
mês: 1 a 12
s2=tree.addMenu(MW_VAR,s1,F("Ano")); //adiciona nó do tipo
terminal na árvore do menu - nó 18
s2->addVar(MW_AUTO_BYTE,&user_ano,0,99,1); //define o valor do
ano: 2016 a 2099
s2=tree.addMenu(MW_VAR,s1,F("Dia semana 0=dom")); //adiciona nó do
tipo terminal na árvore do menu - nó 19
s2->addVar(MW_AUTO_BYTE,&user_dia_semana,0,6,1); //define o dia da
semana: 0=dom, 1=seg...
s2=tree.addMenu(MW_VAR,s1,F("Salvar valores")); //adiciona nó do
tipo terminal na árvore do menu - nó 20
s2->addVar(MW_ACTION,seta_horario); //chama a função que
salva os horários

//SUBMENU QUE REALIZA O TESTE LIGAR/DESLIGAR
s1=tree.addMenu(MW_SUBMENU,r,F("Testes"));
s2=tree.addMenu(MW_VAR,s1, F("Ligar 24C")); //adiciona nó do tipo
terminal na árvore do menu - nó 21
s2->addVar(MW_ACTION,envia_ligar); //chama função que liga
AC
s2=tree.addMenu(MW_VAR,s1,F("Desligar AC")); //adiciona nó do tipo
terminal na árvore do menu - nó 22
s2->addVar(MW_ACTION,envia_desligar); //chama função que des-
liga AC

```

```

tree.navButtons(UP_BOTTON_PIN,DOWN_BOTTON_PIN,LEFT_BOTTON_PIN,RIGHT_BOT-
TON_PIN,ESCAPE_BOTTON_PIN,CONFIRM_BOTTON_PIN);

//FIM DO MENU

}

//LOOP DO MENU PRINCIPAL
void loop() {

    //OPERACAO PARA LER VALORES DE DATA E HORA DO MODULO DS1307
    Wire.beginTransaction(DS1307_ADDRESS);
    Wire.write(zero);
    Wire.endTransmission();
    Wire.requestFrom(DS1307_ADDRESS, 7);

    //GUARDA EM VARIAVEIS OS VALORES DE HORAS, MINUTOS, SEGUNDOS E DIA DA SE-
MANA ATUAIS
    int segundos = ConverteparaDecimal(Wire.read());
    int minutos = ConverteparaDecimal(Wire.read());
    int horas = ConverteparaDecimal(Wire.read() & 0b111111);
    int diadasemana = ConverteparaDecimal(Wire.read());

    //SALVA O VALOR RECEBIDO PELA SERIAL (XBEE)
    if (Serial.available()>0)
    {
        tAC_atual=Serial.read();
    }

    //CONDIÇÕES DO AR CONDICIONADO: HORA ATUAL MAIOR OU IGUAL HORARIO
DE LIGAR O AR CONDICIONADO
    if (horas>=hora_liga && diadasemana != 0 && diadasemana != 6)
    {
        //SE HORARIO ATUAL MENOR OU IGUAL AO HORARIO PROGRAMADO PARA DESLIGAR
        if(horas<=hora_desliga)
        {
            //SE HORA ATUAL MENOR QUE HORARIO DE DESLIGAR, BASTA LIGAR O AR
            if(horas<hora_desliga)
            {
                ligaAr();
            }
            //SE HORA ATUAL FOR IGUAL A HORA DE DESLIGAR, CHECAR
CONDICOES DOS MINUTOS
            else if(minutos>=minuto_liga && minutos<minuto_des-
liga)
            {
                ligaAr();
            }

            else
            {
                desligaAr();
            }
        }
        //SE HORARIO ATUAL MAIOR QUE HORARIO DE DESLIGAR, BASTA DES-
LIGAR O AR CONDICIONADO
        else
        {

```

```

        desligaAr();
    }
}
//SE HORA ATUAL NAO FOR MAIOR OU IGUAL A HORA DE LIGAR O AR CONDI-
CIONADO, OU SE FOR FINAL DE SEMANA BASTA DESLIGAR O AR CONDICIONADO
else
{
    desligaAr();
}
tree.draw();

} //FIM LOOP

//FUNÇÃO QUE DESLIGA O AR CONDICIONADO QUANDO ELE NÃO ESTÁ NO HORÁRIO DE
OPERAÇÃO
void desligaAr() {
    AC_On=false;
    Serial.print('V');
    estadoAC=false;
    timerComando.reset();
}

//FUNCAO QUE CONVERTE O BYTE RECEBIDO EM SINAL DE COMANDO DO AR CONDICIO-
NADO
void enviaComando() {

    if(tAC_atual=='a'){
        Serial.print('A');
        delay(100);
        Serial.print('A');
        delay(100);
        Serial.print('A');
        delay(100);
        temperatura_AC = 18;
    }

    if(tAC_atual=='b'){
        Serial.print('B');
        delay(100);
        Serial.print('B');
        delay(100);
        Serial.print('B');
        delay(100);
        temperatura_AC = 19;
    }

    if(tAC_atual=='c'){
        Serial.print('C');
        delay(100);
        Serial.print('C');
        delay(100);
        Serial.print('C');
        delay(100);
        temperatura_AC = 20;
    }

    if(tAC_atual=='d'){
        Serial.print('D');
        delay(100);
        Serial.print('D');
    }
}

```

```

    delay(100);
    Serial.print('D');
    delay(100);
    temperatura_AC = 21;
}

if(tAC_atual=='e'){
    Serial.print('E');
    delay(100);
    Serial.print('E');
    delay(100);
    Serial.print('E');
    delay(100);
    temperatura_AC = 22;
}

if(tAC_atual=='f'){
    Serial.print('F');
    delay(100);
    Serial.print('F');
    delay(100);
    Serial.print('F');
    delay(100);
    temperatura_AC = 23;
}

if(tAC_atual=='g'){
    Serial.print('G');
    delay(100);
    Serial.print('G');
    delay(100);
    Serial.print('G');
    delay(100);
    temperatura_AC = 24;
}

if(tAC_atual=='o'){
    Serial.print('O');
    delay(100);
    Serial.print('O');
    delay(100);
    Serial.print('O');
    delay(100);
    temperatura_AC=0;
}
}

//FUNCAO QUE ENVIA SINAL DE COMANDO LIGAR AO APARELHO DE AR CONDICIONADO
void ligaAr(){

    //INDICAR QUE O AR CONDICIONADO ESTA DENTRO DO SEU HORARIO DE OPERACAO
    LIGADO, ENVIAR LETRA 'X'
    AC_On=true;
    Serial.print('X');

    if (estadoAC){
        //CASO O AR CONDICIONADO JÁ TENHA SIDO LIGADO, EN-
        VIAR NOVA TEMPERATURA A CADA 3 MINUTOS
        if(tAC_previo != tAC_atual || tAC_op!=tAC_atual){

```

```

//ATUALIZA INFORMACAO DE TEMPERATURA DE OPE-
RACAO
tAC_previo=tAC_atual;

//CHECA SE O TEMPO ENTRE ENVIO DE TEMPERATU-
RAS FOI ATINGIDO
if(timerComando.check()==1){

//ATUALIZA INFORMACAO COM TEMPERATURA
DE OPERACAO DO AR CONDICIONADO
tAC_op=tAC_atual;

//SELECIONA TEMPERATURA DE OPERACAO
CONFORME BYTE RECEBIDO
enviaComando();

//RESETA O TIMER
timerComando.reset();
}
}

//CASO O AR CONDICIONADO ESTEJA SENDO ACIONADO PELA PRIMEIRA VEZ
DENTRO DO HORARIO DE OPERACAO
else{
//ATUALIZA O ESTADO DO AR CONDICIONADO
estadoAC=true;
//ATUALIZA TEMPERATURA DE OPERACAO
tAC_op=tAC_atual;
//ATUALIZA TEMPERATURA PREVIA DE OPERACAO
tAC_previo=tAC_atual;
//ENVIA COMANDO PARA O AR CONDICIONADO
enviaComando();
//RESETA O TIMER
timerComando.reset();
}
}

//FUNÇÃO QUE ESCREVE OS HORÁRIOS ESCOLHIDO PELO USUÁRIO ATRAVÉS DA CENTRAL
void seta_horario(){

byte segundos = 0; //Valores de 0 a 59
Wire.beginTransmission(0x68);
Wire.write(zero);
Wire.write(ConvertParaBCD(segundos));
Wire.write(ConvertParaBCD(user_minutos));
Wire.write(ConvertParaBCD(user_horas));
Wire.write(ConvertParaBCD(user_dia_semana));
Wire.write(ConvertParaBCD(user_dia));
Wire.write(ConvertParaBCD(user_mes));
Wire.write(ConvertParaBCD(user_ano));
Wire.write(zero);
Wire.endTransmission();
}

//FUNÇÃO QUE RECEBE E EXIBE VALOR DE TEMPERATURA EXTERNA
void temp_AC(){

```

```

if(temperatura_AC==0){
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("AC desligado ");
    delay(3500);
}
else {
// Mostra os dados no display
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Temperatura: ");
lcd.print(temperatura_AC);
lcd.print(" C");
delay(3500);
}
}

```

//FUNÇÃO QUE IMPRIME O HORÁRIO NO MENU LCD QUANDO O USUÁRIO SELECIONA HORÁRIO ATUAL

```

void horario(){

// Lê os valores (data e hora) do modulo DS1307
Wire.beginTransmission(DS1307_ADDRESS);
Wire.write(zero);
Wire.endTransmission();
Wire.requestFrom(DS1307_ADDRESS, 7);
int segundos = ConverteparaDecimal(Wire.read());
int minutos = ConverteparaDecimal(Wire.read());
int horas = ConverteparaDecimal(Wire.read() & 0b111111);
int diadasemana = ConverteparaDecimal(Wire.read());
int diadomes = ConverteparaDecimal(Wire.read());
int mes = ConverteparaDecimal(Wire.read());
int ano = ConverteparaDecimal(Wire.read());

// Mostra os dados no display
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print(" ");
// Acrescenta o 0 (zero) se a hora for menor do que 10
if (horas <10)
    lcd.print("0");
lcd.print(horas);
lcd.print(":");
// Acrescenta o 0 (zero) se minutos for menor do que 10
if (minutos < 10)
    lcd.print("0");
lcd.print(minutos);
lcd.setCursor(0,1);
// Mostra o dia da semana
switch(diadasemana)
{
    case 0:lcd.print("Dom ");
    break;
    case 1:lcd.print("Seg ");
    break;
    case 2:lcd.print("Ter ");
    break;
    case 3:lcd.print("Qua ");
    break;

```

```

        case 4:lcd.print("Qui ");
        break;
        case 5:lcd.print("Sex ");
        break;
        case 6:lcd.print("Sab ");
    }
    lcd.setCursor(4,1);
    // Acrescenta o 0 (zero) se dia do mes for menor do que 10
    if (diadomes < 10)
        lcd.print("0");
    lcd.print(diadomes);
    lcd.print("/");
    // Acrescenta o 0 (zero) se mes for menor do que 10
    if (mes < 10)
        lcd.print("0");
    lcd.print(mes);
    lcd.print("/");
    lcd.print(ano);
    lcd.print("      ");
    delay(3500);
} //final função horario - Exibe horario no display LCD

//FUNÇÃO DO RTC: CONFIGURA O HORÁRIO DO RTC
void SeleccionaDataeHora() //Seta a data e a hora do DS1307
{
    byte segundos = 0; //Valores de 0 a 59
    byte minutos = 55; //Valores de 0 a 59
    byte horas = 12; //Valores de 0 a 23
    byte diadasemana = 5; //Valores de 0 a 6 - 0=Domingo, 1 = Segunda, etc.
    byte diadomes = 15; //Valores de 1 a 31
    byte mes = 1; //Valores de 1 a 12
    byte ano = 16; //Valores de 0 a 99
    Wire.beginTransmission(DS1307_ADDRESS);
    Wire.write(zero); //Stop no CI para que o mesmo possa receber os dados

    //As linhas abaixo escrevem no CI os valores de
    //data e hora que foram colocados nas variaveis acima
    Wire.write(ConverteParaBCD(segundos));
    Wire.write(ConverteParaBCD(minutos));
    Wire.write(ConverteParaBCD(horas));
    Wire.write(ConverteParaBCD(diadasemana));
    Wire.write(ConverteParaBCD(diadomes));
    Wire.write(ConverteParaBCD(mes));
    Wire.write(ConverteParaBCD(ano));
    Wire.write(zero);
    Wire.endTransmission();
}

//FUNÇÕES DE CONVERSÃO DO RTC
byte ConverteParaBCD(byte val)
{
    //Converte o número de decimal para BCD
    return ( (val/10*16) + (val%10) );
}

//FUNÇÃO DE CONVERSÃO DO RTC
byte ConverteparaDecimal(byte val)
{
    //Converte de BCD para decimal
    return ( (val/16*10) + (val%16) );
}

```

```
}  
  
//FUNÇÃO QUE ENVIA O SINAL PARA LIGAR O AR CONDICIONADO EM 24 C  
void envia_ligar(){  
    Serial.print('Y');  
}  
  
//FUNÇÃO QUE ENVIA O SINAL PARA DESLIGAR O AR CONDICIONADO  
void envia_desligar(){  
    Serial.print('Z');  
}
```

ANEXO D – VALORES DE TEMPERATURA MÁXIMA, TEMPERATURA COMPENSADA MÉDIA, UMIDADE RELATIVA E ÍNDICE DE CALOR PARA A REGIÃO DE SÃO PAULO

Data	Temperatura Máxima	Temperatura Compensada Média	Umidade Relativa Média	Índice de calor (°C) - T. Máxima	Índice de calor (°C)- T. Comp. Média
01/01/2016	30,3	24,1	76,75	37	24
02/01/2016	26,9	22,86	88,25	30	22
03/01/2016	23,9	21,5	88,75	23	21
04/01/2016	26,4	21,48	74,5	26	21
05/01/2016	29,5	22,96	66,5	33	22
06/01/2016	31,7	23,76	67,5	38	23
07/01/2016	32,2	25,22	57,5	36	25
08/01/2016	33,3	25,94	62,75	41	25
09/01/2016	30,4	24,32	83,75	40	24
10/01/2016	28,2	23,66	83,5	33	23
11/01/2016	23,5	22,44	85	23	22
12/01/2016	25,5	22,8	89	25	22
13/01/2016	29,6	24,56	85	37	24
14/01/2016	26,6	22,9	95	26	22
15/01/2016	22,6	20,62	91	22	20
16/01/2016	25,3	20,98	75	25	20
17/01/2016	27	20,92	69	28	20
18/01/2016	23,2	19,9	85	23	19
19/01/2016	22,2	19,76	69	22	19
20/01/2016	22,8	19,76	84	22	19
21/01/2016	25,8	20,7	71	25	20
22/01/2016	24,6	20,14	79	24	20
23/01/2016	28	21,58	80	32	21
24/01/2016	28,2	22,3	89	34	22

25/01/2016	32,3	24,78	85	47	24
26/01/2016	33,5	25,34	66	43	25
27/01/2016	30	23,52	89,25	40	23
28/01/2016	29	23,72	75,75	33	23
29/01/2016	28,7	24,74	71,75	32	24
30/01/2016	31	26,24	63	35	26
31/01/2016	33,6	28,18	40,25	34	27
01/02/2016	33,5	27,68	54,75	38	28
02/02/2016	31,6	25,62	79	42	25
03/02/2016	31,8	25,14	74	41	25
04/02/2016	29,3	24,96	76	34	24
05/02/2016	33,3	25,34	84	51	25
06/02/2016	29,2	23,62	86	36	23
07/02/2016	30,5	24,42	81	39	24
08/02/2016	33	24,9	82	49	24
09/02/2016	32,5	27,14	63	39	28
10/02/2016	32,5	26,4	71	42	26
11/02/2016	27,8	23,62	83	32	23
12/02/2016	28,4	22,44	73	31	22
13/02/2016	30,3	23,58	78	37	23
14/02/2016	33,6	26,92	70	45	28
15/02/2016	31	24,5	80	40	24
16/02/2016	28,7	24,06	75	32	24
17/02/2016	30,8	25,18	71,5	37	25
18/02/2016	31,5	25,04	72,75	39	25
19/02/2016	31,6	25,38	72	39	25
20/02/2016	31,6	24,84	75,5	41	24
21/02/2016	25,5	23,14	80	25	23
22/02/2016	24,4	22,36	84,75	24	22
23/02/2016	26,8	22,98	77,25	29	22

24/02/2016	29,2	23,08	79,5	35	23
25/02/2016	31,1	25,48	62,75	35	25
26/02/2016	30,4	24,66	76,75	37	24
27/02/2016	25,6	24,1	77,25	25	24
28/02/2016	28	22,94	84,75	32	22
29/02/2016	21,2	19,82	79,75	21	19
01/03/2016	20,4	18,52	92	20	18
02/03/2016	24,3	20,56	92	24	20
03/03/2016	25,2	21,46	84,5	25	21
04/03/2016	28,4	23,32	82,75	33	23
05/03/2016	29	23,2	73,75	33	23
06/03/2016	31,1	24,2	78,5	40	24
07/03/2016	31,4	23,42	82,5	43	23
08/03/2016	31,2	24,1	78,25	40	24
09/03/2016	31,5	25,52	70,75	39	25
10/03/2016	25,9	22,22	91,25	25	22
11/03/2016	26,9	23,44	83,75	29	23
12/03/2016	27,8	21,82	76,25	31	21
13/03/2016	23,6	20,7	80	23	20
14/03/2016	27,5	21,96	83,25	31	21
15/03/2016	28,7	23,08	73,5	32	23
16/03/2016	26,3	22,3	75,5	26	22
17/03/2016	28,9	22,88	73	33	22
18/03/2016	29,2	23,58	70,25	33	23
19/03/2016	31,7	23,6	65,5	38	23
20/03/2016	28,8	22,64	72,5	32	22
21/03/2016	31,2	24,92	69,75	38	24
22/03/2016	30,3	24,96	61,25	33	24
23/03/2016	28,8	23,14	80,25	34	23
24/03/2016	27,4	21,64	78,75	30	21

25/03/2016	28,8	22,68	79,75	34	22
26/03/2016	28,4	24,4	68	31	24
27/03/2016	29,7	25,32	71,25	34	25
28/03/2016	30,8	25,2	78	39	25
29/03/2016	31,3	24,44	74,5	39	24
30/03/2016	29,5	24,12	78	35	24
31/03/2016	31	24,66	73,75	38	24
01/04/2016	29,4	24,08	72,75	34	24
02/04/2016	29,7	22,64	79,75	36	22
03/04/2016	31,4	25	70,25	38	25
04/04/2016	29	23,54	72,5	33	23
05/04/2016	29,6	22,94	71,75	34	22
06/04/2016	30,4	24,46	69,25	35	24
07/04/2016	32,1	25,18	55,75	36	25
08/04/2016	30,5	24,94	71,5	36	24
09/04/2016	32,9	25,34	67,75	42	25
10/04/2016	31	25,04	74,25	38	25
11/04/2016	29,5	24,12	73,75	34	24
12/04/2016	31,7	24,24	71,75	40	24
13/04/2016	31,4	24,86	70,75	38	24
14/04/2016	31,8	25,9	58,75	36	25
15/04/2016	32,3	25,92	67,25	40	25
16/04/2016	31,1	25,52	54	33	25
17/04/2016	32	25,34	57,25	36	25
18/04/2016	32,4	25,76	57	37	25
19/04/2016	31,5	26,3	60,25	36	26
20/04/2016	31	25,9	62,75	35	25
21/04/2016	31,3	25,34	50	33	25
22/04/2016	30,5	24,66	63,5	34	24
23/04/2016	31,5	25,8	55	34	25

24/04/2016	31,3	26,04	53,5	33	26
25/04/2016	30,9	25,9	49,5	32	25
26/04/2016	26,8	22,14	69	28	22
03/05/2016	25,6	18,3	68,25	25	18
04/05/2016	25,5	18,76	70,5	25	18
05/05/2016	24,8	19,08	74,75	24	19
06/05/2016	26,7	19,94	71	28	19
07/05/2016	23,4	19,64	80,25	23	19
08/05/2016	23,2	19,94	77,5	23	19
09/05/2016	25	20,56	72	25	20
10/05/2016	24,2	20,14	75	24	20
11/05/2016	23,7	19,28	77,25	23	19
12/05/2016	22	18,1	88,25	22	18
13/05/2016	21,7	17,38	77,5	21	17
14/05/2016	22,7	17,8	72	22	17
15/05/2016	26,5	20,88	62,5	26	20
16/05/2016	27,3	21,56	75,5	29	21
17/05/2016	24,8	17,98	81	24	17
18/05/2016	16,6	15,72	96,25	16	15
19/05/2016	16,5	14,92	92,25	16	14
20/05/2016	23,6	18,36	86,75	23	18
21/05/2016	19,7	17,62	88,25	19	17
22/05/2016	26,5	20,94	70,75	26	20
25/05/2016	21,9	16,18	79,25	21	16
26/05/2016	24,2	17,64	79,5	24	17
27/05/2016	20	17,1	84,25	20	17
28/05/2016	21,7	18,08	83	21	18
29/05/2016	22	17,56	80,5	22	17
30/05/2016	21	17,2	83,25	21	17
31/05/2016	23,8	19,6	77,25	23	19

01/06/2016	23,5	20,58	77,25	23	20
02/06/2016	23,4	18,04	81,25	23	18
03/06/2016	20,8	17,3	91,5	20	17
04/06/2016	20	17,22	94	20	17
05/06/2016	22,2	19,6	90,5	22	19
06/06/2016	23,5	19,5	89,75	23	19
16/06/2016	25,5	17,36	69,25	25	17
17/06/2016	25,4	19,28	58,5	25	19
19/06/2016	24,5	16,22	77,75	24	16
23/06/2016	23,9	16,68	72,25	23	16
27/06/2016	22,4	15,1	81,5	22	15
29/06/2016	24,2	18,08	78,25	24	18
30/06/2016	23,5	18,48	64,5	23	18
01/07/2016	24,4	17,44	77,25	24	17
02/07/2016	26,4	19,5	78	26	19
03/07/2016	26,4	20,2	60,75	26	20
04/07/2016	26,4	19,38	66,5	26	19
05/07/2016	26,2	19,66	62,75	26	19
06/07/2016	26,4	22,32	50,25	26	22
10/07/2016	27,9	18,84	59	29	18

Disponível em <<http://www.cptec.inpe.br/cidades/tempo/244>> . Acesso em 20 Janeiro 2017.